



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRI MUSTONEN
VIRTAKISKON VIRRRAN MITTAAMINEN AVOIMEN
MAGNEETTIPIIRIN HALL-ANTURILLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Karri Palovuori
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Tieto- ja
sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 8. lokakuuta 2014

TIIVISTELMÄ

HENRI MUSTONEN: Virtakiskon virran mittaaminen avoimen magneettipiirin Hall-anturilla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 84 sivua, 2 liitesivua

Toukokuu 2015

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Elektroniikan tuotesuunnittelu

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: Hall-anturi, kompensoimaton, kompensoitu, Fluxgate, GMR, virta-anturi, virranmittaus

Tässä työssä tutkitaan avoimen magneettipiirin Hall-anturin käyttöä virtakiskon virranmittauksessa. Sovelluskohteena työssä on tasasähkökatkoja, mutta tuloksia voidaan hyödyntää myös muissa vastaavissa sovelluksissa.

Työn teoriaosuudessa käsitellään Hall-anturin toimintaympäristöä ja virranmittauksen tehtäviä. Lisäksi tutustutaan magneettikenttään perustuviin virta-antureihin liittyviin fysikaalisiin ilmiöihin, kuten sähkömagnetismiin ja Hall-ilmiöön, sekä virta-anturien epäideaalisuuksiin. Työssä tarkastellaan tarkemmin kolmea erityyppistä Hall-anturia ja vertaillaan näiden ominaisuuksia. Lisäksi tutustutaan Fluxgate-, GMR- ja sunttivirta-anturien sekä Rogowski-kelan ja virtamuuntajan toimintaan.

Työssä tutkitaan Allegro A1363 Hall-anturia mittaamalla sen staattista ja dynaamista suorituskkyä. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta anturin staattisen ja dynaamisen suorituskyvyn olevan hyvä, ja anturin olevan potentiaalinen vaihtoehto korvaamaan muita virtakiskon virranmittausmenetelmiä. Tämä vaatii kuitenkin lisätutkimuksia, sillä mittauksia ei suoritettu todellisessa häiriöisessä ympäristössä, vaan laboratorio-olosuhteissa.

ABSTRACT

HENRI MUSTONEN: Busbar current measurement with an open magnetic circuit Hall-effect sensor

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 84 pages, 2 Appendix pages

May 2015

Master of Science Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Electronics Product Design

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: Hall-sensor, open-loop, closed-loop, Fluxgate, GMR, current sensor, current measurement

This thesis investigates busbar current measurement with an open magnetic circuit Hall-effect sensor. A main application area is DC-DC converter but the results of this thesis can also be used in other similar application areas.

Operational environment of the Hall-sensor and the purpose of the current measurement are discussed in the theory part of this thesis. In addition the physical phenomena, as electromagnetism and the Hall-effect, and the non-idealities of current sensors are explained. The three different types of Hall-sensors and their differences are inspected in detail. In addition the working principles of the Fluxgate- and GMR-sensors, shunt resistor, Rogowski-coil and current transformer are examined.

Allegro A1363 Hall-sensor is examined by measuring its static and dynamic performance. The measurements indicate that the static and dynamic performance of the Hall-sensor is good and it seems to be potential sensor for the busbar current measurement. However it requires more research because the measurements weren't done in a true environment where there are electromagnetic interferences.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Drives -yksikössä Helsingissä. Haluan kiittää erityisesti työni ohjaajaa Mika Niemeä ja tarkastajaa Karri Palovuorta ohjauksesta sekä neuvoista, joita olen työn aikana saanut.

Kiitos myös ABB Drivesille mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työkavereita, jotka ovat auttaneet työhön liittyvissä asioissa ja joilta olen saanut vinkkejä mittausten suorittamiseen.

Tampereella, 7.5.2015

Henri Mustonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖKÄYTTÖ	3
2.1	Taajuusmuuttaja	4
2.2	Tasasähkökatkoja.....	5
2.3	Virtatiedon käyttö	7
2.3.1	Virtatiedon käyttö moottorisäädössä.....	7
2.3.2	Virtatiedon käyttö tasasähkökatkojan säädössä.....	9
2.3.3	Virtatiedon käyttö valvonta- ja suojaustoiminnoissa.....	10
3.	SÄHKÖMAGNETISMI.....	11
3.1	Sähkömagneettinen induktio	11
3.2	Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen	14
3.3	Hystereesi.....	16
4.	HALL-ILMIÖ	18
5.	VIRTA-ANTURIEN SUORITUSKYKY	21
5.1	Staatista suorituskyyä kuvaavat ominaisuudet.....	21
5.1.1	Vahvistus	21
5.1.2	Virranmittausalue.....	21
5.1.3	Nollapistepoikkeama.....	22
5.1.4	Vahvistusvirhe	23
5.1.5	Epälineaarisuus	24
5.2	Dynaamista suorituskyyä kuvaavat ominaisuudet.....	27
5.2.1	Kaistanleveys.....	27
5.2.2	Vasteaika, nousuaika, nousunopeus ja reaktioaika	28
6.	VIRRANMITTAUS HALL-ANTURILLA	30
6.1	Hall-elementin materiaali.....	30
6.2	Kompensoimaton Hall-anturi.....	32
6.2.1	Avoimen magneettipiirin Hall-anturi.....	32
6.2.2	Suljetun magneettipiirin Hall-anturi	33
6.2.3	Avoimen ja suljetun magneettipiirin Hall-anturien yhteiset ominaisuudet.....	35
6.3	Kompensoitu Hall-anturi.....	36
6.4	Yhteen veto Hall-antureista.....	39
7.	VIRRANMITTAUS MUILLA MENETELMILLÄ.....	40
7.1	Fluxgate.....	40
7.1.1	Toimintaperiaate	40
7.1.2	Edut ja haitat.....	43
7.2	GMR	44
7.2.1	Toimintaperiaate	44
7.2.2	Edut ja haitat.....	45

7.3	Suntti.....	46
7.3.1	Toimintaperiaate	46
7.3.2	Edut ja haitat.....	46
7.4	Rogowski-kela.....	47
7.4.1	Toimintaperiaate	47
7.4.2	Edut ja haitat.....	48
7.5	Virtamuuntaja.....	49
7.5.1	Toimintaperiaate	49
7.5.2	Edut ja haitat.....	49
7.6	Eri virranmittausmenetelmien yhteenveto	49
8.	VIRRANMITTAUS ALLEGRO A1363 IC HALL-ANTURILLA	52
8.1	Tutkittava Hall-anturi	52
8.2	Ulkoisen magneettikentän kompensointi.....	53
9.	SIMULOINNIT	55
9.1	Simuloinnissa käytetty rakenne.....	55
9.2	Virtakiskoa ympäröivä magneettikenttä	56
9.3	Ferromagneettisen materiaalin vaikutus	60
9.4	Ulkoisen magneettisen hajakentän vaikutus	61
9.5	Simulointitulosten yhteenveto.....	64
10.	MITTAUKSET	65
10.1	Mittausjärjestelyt	65
10.2	Nollapistepoikkeama	68
10.3	Vahvistusvirhe.....	69
10.4	Lineaarisuusvirhe.....	71
10.5	Hall-anturin sijainnin vaikutus mittaustuloksiin	73
10.6	Dynaaminen suorituskky.....	77
10.7	Mittaustulosten yhteenveto	80
11.	YHTEENVETO.....	81
	LÄHTEET	82

LIITE A: MITTALAITTEET

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DTC	Suora vääntömomenttisäätö (Direct Torque Control)
GMR	Suuri magnetoresistanssi (Giant Magnetoresistance). GMR-anturin resistanssi muuttuu ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta.
GTO-tyristori	Hilalta sulkutilaan ohjattava tyristori (Gate Turn-Off)
MOSFET	Metallioksidi-puolijohdekanavatransistori (Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
IGBT	Bipolaaritransistori, jonka hila on eristetty (Insulated Gate Bipolar Transistor)
A	pinta-ala
\mathbf{B}	magneettivuon tiheys
B_r	remanenssivuon tiheys
C	suljettu käyrä
d	Hall-elementin korkeus
e	elektronin varaus
\mathbf{E}_H	Hall-kenttä
E_{ind}	indusoitunut jännite
f	taajuus
f_0	keskitaajuus
f_{ala}	alarajataajuus
f_{BW}	-3 dB ylärajataajuus
$f_{\text{ylä}}$	ylärajataajuus
\mathbf{F}_H	Hall-voima
\mathbf{F}_L	Lorentz-voima
G	anturin vahvistus / herkkyys
G_e	vahvistusvirhekerroin
G_{ref}	päätepisteen menetelmän ohjearvosuoran kulmakerroin
\mathbf{H}	magneettikentän voimakkuus
H_c	koersitiivikentän voimakkuus
i	virran hetkellisarvo
I	virta
i_a, i_b, i_c	moottorivaiheiden virtojen hetkellisarvot
I_c	ohjausvirta
I_d, I_q	staattorivirtavektorin d- ja q-komponentit
I_{enc}	käyrän C rajoittaman pinnan lävistävien virtojen summa
I_m, i_m	mitattu virta
I_N	nimellisvirta
I_{offset}	nollapistepoikkeama
I_p, i_p	mitattava virta
i_s	kompensointivirta
\mathbf{i}_s	staattorivirtavektori
i_{si}	Fluxgate-elementin heräteköömin virta
i_U, i_V	mitatut staattorivirrat
\mathbf{J}	virrantiheys
n	varaustenkuljettajien lukumäärä tilavuusyksikköä kohti
N	johtimien tai johdinkierrosten lukumäärä

N_p	mitattavan virtajohtimen kierrosten lukumäärä
N_s	kompensointikäämin kierrosten lukumäärä
p	napapariluku
\mathbf{r}	yksikkövektori
r	etäisyys
R_H	Hall-vakio
R_m	mittausvastuksen resistanssi
R_s	staattoriresistanssi
T_+	aika jonka vaihtokytkin on yläasennossa
T_-	aika jonka vaihtokytkin on ala-asennossa
T_e	oikosulkumoottorin vääntömomentti
t_{ra}	reaktioaika
t_{rp}	vasteaika
t_{rs}	nousuaika
$t_{rs,p}$	todellisen virran nousuaika
u	jännitteen hetkellisarvo
U_{0H}	Hall-elementin nollapistejännite
U_{dc}	tasajännite
U_H, u_H	Hall-jännite
U_{ka}	vaihtelevan tasajännitteen keskiarvo
u_m	virta-anturin ulostulojännite
u_{m0}	virta-anturin ulostulojännite, kun magneettivuon tiheys on nolla
\mathbf{u}_s	staattorikäämin jännitevektori
U_s	käyttöjännite
u_{si}	Fluxgate-elementin herätejännite
\mathbf{v}	nopeus
w	Hall-elementin leveys
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti
Φ	magneettivuon hetkellisarvo
Φ	magneettivuo
Φ_p	mitattavan virran synnyttämä magneettivuo
Φ_s	kompensointivirran synnyttämä magneettivuo
Φ_{si}	Fluxgate-elementin virran synnyttämä magneettivuo
Ψ_s	staattorikäämivuo

1. JOHDANTO

Sähkökäytössä on tarpeen mitata virtaa laitteiston useista kohdista moottorisäädön sekä erilaisten valvonta- ja suojaustoimintojen vuoksi. Tyypillistä näille mittauksille on laaja virranmittausalue, kaistanleveys sekä lämpötila-alue. Nämä asettavat virta-antureille suuria vaatimuksia suorituskyvyn suhteen.

Sähkökäytön virranmittaukseen on tarjolla useita erilaisia vaihtoehtoja, kuten sunttivastuksia, virtamuuntajia tai Hall-anturiin perustuvia ratkaisuja. Jokaisella menetelmällä on sekä etuja että haittoja, joten tietyn ratkaisun soveltuvuus tiettyyn käyttötarkoitukseen ei ole itsestään selvää. Antureita kehitetään jatkuvasti niiden suorituskyvyn parantamiseksi, joten aiemmin tiettyyn käyttötarkoitukseen soveltumaton anturi voi nykyään soveltua siihen hyvin. Uusien virranmittausmenetelmien hyödyntämisestä voidaan saada monia hyötyjä, kuten alhaisemmat kustannukset sekä anturin parempi suorituskyky ja pienempi koko.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää avoimen magneettipiirin Hall-anturin soveltuvuutta virtakiskon virranmittaukseen, kun virtakiskossa kulkevan virran suuruus on useita satoja ampeereja. Tämän työn pääasiallisena sovelluskohteena on tasasähkökatkoja, mutta työssä saatavia tuloksia voidaan hyödyntää myös muissa sovelluksissa. Tämän vuoksi työssä selvitetään Hall-anturin soveltuvuutta virtakiskon virranmittaukseen yleisellä tasolla. Työssä tutustutaan avoimen magneettipiirin Hall-anturin lisäksi myös muihin Hall-anturiin perustuviin virranmittausmenetelmiin, kuten kompensoimattomaan suljetun magneettipiirin Hall-anturiin sekä kompensoituun Hall-anturiin. Hall-antureihin perustuvien virranmittausmenetelmien lisäksi tarkastellaan kahden muun magneettikenttään perustuvan virta-anturin, Fluxgaten ja GMR:n, toimintaa ja soveltuvuutta tähän käyttötarkoitukseen. Vertailun vuoksi tutustutaan lisäksi erityyppisiin virranmittausmenetelmiin, kuten sunttivirta-anturiin sekä Rogowski-kelaan ja virtamuuntajaan.

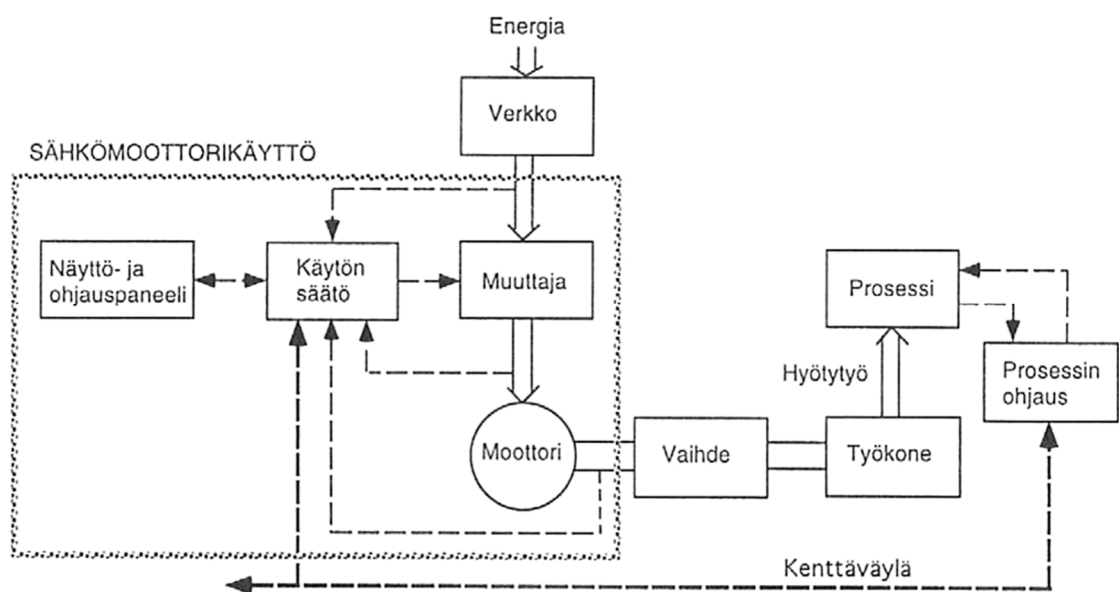
Tarkempien mittausten kohteena työssä on eräs avoimen magneettipiirin Hall-anturi. Mittausten avulla tutkitaan kyseisen anturin staattista ja dynaamista suorituskykyä. Mittaustuloksia voidaan hyödyntää selvitetessä, onko kyseinen Hall-anturi mahdollinen korvaamaan eri sovellusten nykyisiä virranmittausmenetelmiä.

Luvussa 2 tutustutaan tämän työn kannalta olennaisiin sähkökäytön komponentteihin sekä virranmittauksen eri tehtäviin sähkökäytössä. Luvussa 3 perehdytään sähkömagnetismiin, eli fysikaaliseen ilmiöön, johon työssä tarkasteltavien virta-anturien toiminta perustuu. Luku 4 esittelee tarkemmin Hall-anturien toiminnan taustalla olevaa

Hall-ilmiötä ja luku 5 virta-anturien staattista ja dynaamista suorituskkyä kuvaavia ominaisuuksia. Luvussa 6 tutustutaan kompensoimattoman avoimen ja suljetun magneettipiirin Hall-anturin sekä kompensoidun Hall-anturin toimintaperiaatteisiin, ja vertaillaan kyseisten anturien ominaisuuksia. Luvussa 7 tutustutaan kahteen muuhun magneettikenttään perustuvaan virta-anturiin, Fluxgateen ja GMR:ään. Lisäksi vertailukohtana esitellään suntin, Rogowski-kelan ja virtamuuntajan toimintaa ja ominaisuuksia. Luvussa 8 esitellään tarkempien mittausten kohteena oleva Hall-anturi ja sen tärkeimmät ominaisuudet. Luvussa 9 tarkastellaan simulointien avulla magneettikentän käyttäytymistä virtakiskon ympärillä erilaisissa tilanteissa. Luvussa 10 esitellään Hall-anturin suorituskvyn mittauksen mittausjärjestelyt ja mittaustulokset sekä analysoidaan tuloksia.

2. SÄHKÖKÄYTTÖ

Sähkömoottorikäyttö, eli sähkökäyttö, on sähkön syöttöverkon ja prosessin välinen järjestelmä, joka muuttaa syöttöverkon sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi tehoelektroniikan ja sähkömoottorien avulla. Sähkökäytöksi kutsutaan myös tilannetta, jossa mekaanista energiaa muutetaan sähköenergiaksi. [1] Kuvassa 1 on esitetty sähkökäytön rakenne sähköjärjestelmän osana.



Kuva 1. Sähkökäyttö sähköjärjestelmän osana [1]

Sähkökäyttö voidaan jakaa energiaa siirtävään sähkömekaaniseen osaan ja sitä ohjaavaan säätöosaan. Sen tehtävänä on mahdollistaa liikkeen ohjaus sähkömoottorin akselin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia säätämällä. Sähkömoottorin akselin pyörimisliike muutetaan työkoneen avulla liikkeeksi, eli hyötytyöksi, prosessiin. [1]

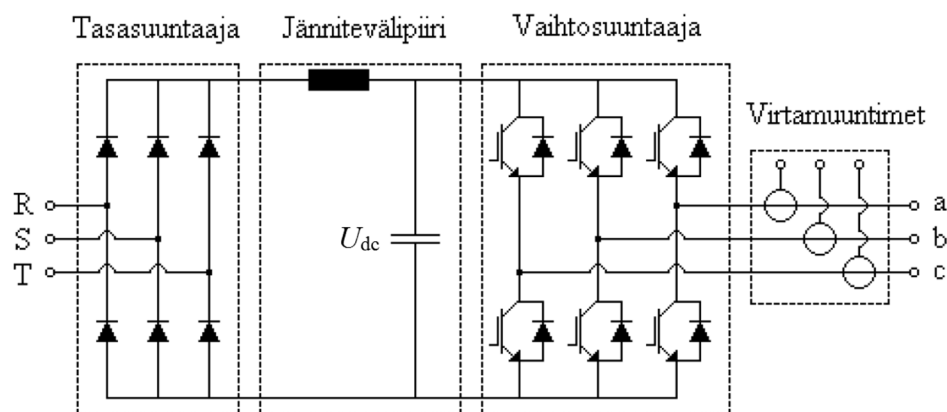
Sähköenergia, jonka sähkökäyttö muuttaa mekaaniseksi energiaksi, saadaan yleensä kolmivaiheisesta sähköverkosta. Energialähde voi olla myös muu, kuten esimerkiksi generaattori tai akku. Muuttajan tehtävänä on muuttaa sähköverkon vakiotaajuinen ja -jännitteinen sähkö sähkömoottorin tarvitsemaan muotoon jännitteen suuruutta ja usein myös taajuutta muuttamalla. Muuttajia on olemassa pääasiassa neljää eri tyyppiä: tasasuuntaaja (AC-DC), vaihtosuuntaaja (DC-AC), tasasähkökatkoja (DC-DC) sekä taajuusmuuttaja (AC-AC). Seuraavaksi tarkastellaan taajuusmuuttajan sekä tämän työn pääasiallisena sovelluskohteena olevan tasasähkökatkojan toimintaa.

2.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkalaite, joka kytketään vaihtosähköverkon sekä vaihtosähkömoottorin välille. Sen tehtävänä on säätää sähkömoottoria muuttamalla sähköverkon vaihtosähkö sähkömoottorille halutun suuruiseksi ja taajuiseksi vaihtosähköksi. Taajuusmuuttajia käytetään monissa teollisuuden sovelluksissa, joissa on käytössä vaihtosähkömoottoreita. Tyypillisiä sovelluskohteita ovat muun muassa pumput, hissit, kuljettimet, paperikoneiden voimansiirrot sekä laivojen potkurikäytöt.

Taajuusmuuttajia on olemassa kahta päätyyppiä: välipiirillisiä ja suoria. Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaihtosähkö muutetaan tasasähkön kautta eri taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi. Suorissa taajuusmuuttajissa vaihtosähkö muutetaan suoraan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi puolijohdekytkimiä käyttämällä. [1]

Välipiirillinen taajuusmuuttaja on tyypillinen taajuusohjatussa sähkömoottorikäytössä [2]. Se voidaan luokitella välipiirin perusteella jänniteohjattuihin ja virtaohjattuihin taajuusmuuttajiin. Välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta: tasasuuntaajasta, jännite- tai virtavälipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta. Virtavälipiiri muodostuu tasoituskuristimesta, jolla pienennetään tasavirran aaltoisuutta. Jännitevälipiiri puolestaan sisältää kondensaattorin, jolla pienennetään tasajännitteen aaltoisuutta. Vaihtosuuntaajan tyyppi riippuu välipiirin tyypistä. [1] Kuvan 2 mukainen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja on huomattavasti virtavälipiirillistä taajuusmuuttajaa yleisempi ja soveltuu paremmin useimpiin käyttötarkoituksiin [2].

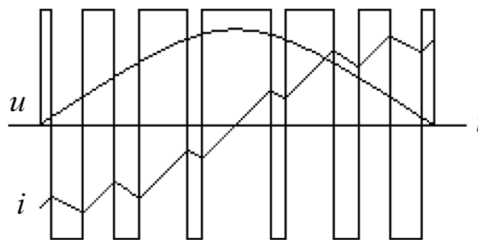


Kuva 2. Jännitevälipiiritajuusmuuttaja (muokattu lähteestä [2])

Tasasuuntaajan tehtävänä on muuttaa sähköverkon kolmivaiheinen vaihtojännite aaltoilevaksi tasajännitteeksi. Se voidaan toteuttaa tyristoreilla, diodeilla, tehotransistoreilla tai näiden yhdistelmillä [1]. Yleisin ja yksinkertaisin toteutustapa on

kuvan 2 mukainen diodikytkeä. Koska tasasuuntaajan antama tasajännite ei ole täysin tasaista vaan aaltoilevaa, tarvitaan jännitevälipiiriä. Jännitevälipiirin LC-alipäästösuodatin vakauttaa vaihtosuuntaajan syöttöä tasoittamalla jännitteen aaltoisuutta. Vaihtosuuntaajan puolijohdekytkimillä jännitevälipiirin tasasähkö muutetaan takaisin halutun suuruisiksi ja taajuisiksi vaihtosähköksi. [2]

Jännitevälipiiritäajuusmuuttajan lähtöjännitettä säädetään pulssinleveysmoduloinnilla. Pulssinleveysmoduloinnissa lähtöjännitteen keskiarvoa säädetään signaalin pulssisuhdetta muuttamalla. Signaalin pulssisuhdetta muutetaan kytkemällä vaihtosuuntaajan kytkimiä jaksottaisesti. Tämä kytkee jännitevälipiirin tasajännitettä moottorin liittimiin siten että pulsseista muodostuu kolmivaiheinen sinimuotoinen vaihtojännite. [2] Kuvassa 3 on esitetty pulssinleveysmoduloidun taajuusmuuttajan yhden moottorivaiheen lähtöjännitteen pulssikuvio sekä lähdön jännite u ja virta i .



Kuva 3. Pulssinleveysmoduloidun taajuusmuuttajan lähtöjännitteen pulssikuvio sekä lähdön jännite ja virta (muokattu lähteestä [2])

Jännitevälipiiritäajuusmuuttajan lähtöjännitettä voidaan säätää myös välipiirin tasajännitettä muuttamalla. Tämä edellyttää diodisillan korvaamista esimerkiksi ohjatulla tyristorisillalla, koska diodisiltaa ei voi ohjata. Välipiirin kondensaattorin suuren kapasitanssin vuoksi jännitteen muuttaminen on hidasta, ja sen vuoksi pulssinleveysmodulointi on yleisempi tapa lähtöjännitteen muuttamiseksi. [1]

2.2 Tasasähkökatkoja

Tasasähkökatkoja on muun muassa tasasähkömoottoreiden ohjauksessa käytettävä tehoelektroniikkalaite, jonka tehtävänä on muuttaa tasajännitteen suuruutta. Sen toiminta perustuu kuormalle, eli esimerkiksi moottorille, syötettävän tasasähkön katkomiseen sopivin väliajoin. Tasasähkökatkoja voidaan toteuttaa erilaisilla kytkinkomponenteilla, kuten MOSFET:illa, IGBT-transistoreilla tai GTO-tyristoreilla. Kuvassa 4 on esitetty yksinkertaisen tasasähkökatkojan toimintaperiaate sekä lähtöjännitteen ja -virran käyrämuoto. Siinä tasasähkökatkojana toimii vaihtokytkin.

Kun kuormalle syötettävää tasajännitettä U_{dc} katketaan suurella nopeudella, saadaan aikaan vaihtelevaa tasajännitettä u . Ajanjakson T_+ aikana kytkin on yläasennossa, jolloin kuorman yli oleva jännite u on sama kuin katkottava tasajännite U_{dc} . Ajanjakson T_- aikana kytkin on ala-asennossa ja kuorman yli oleva jännite u on nolla. Vaihtelevan tasajännitteen keskiarvoksi saadaan

$$U_{ka} = \frac{T_+}{T_+ + T_-} U_{dc} \quad (1)$$

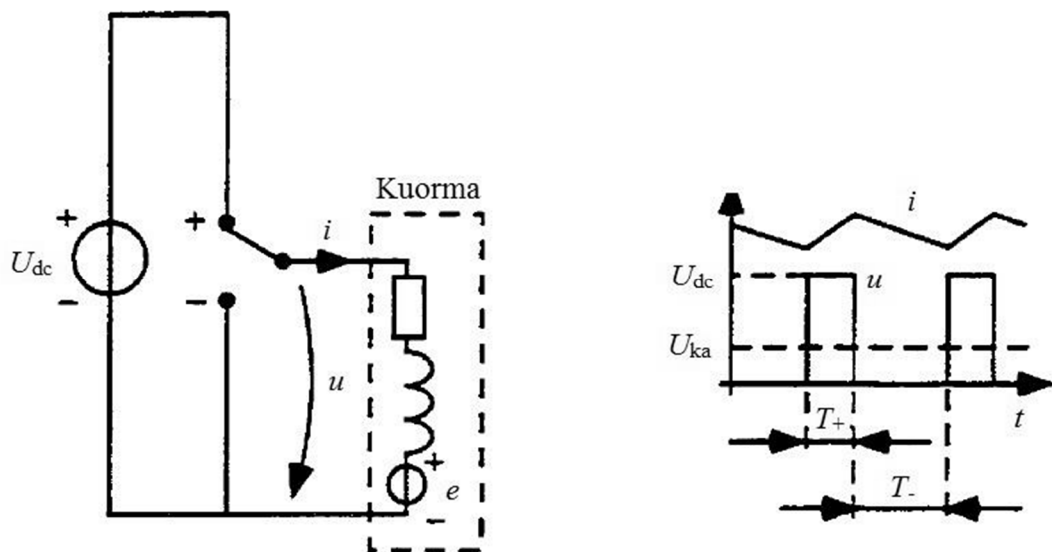
Koska

$$0 \leq \frac{T_+}{T_+ + T_-} \leq 1 \quad (2)$$

pätee aina, niin

$$U_{ka} \leq U_{dc} \quad (3)$$

Tällainen kytkentä toimii siis jännitettä laskevana katkojana, kun teho siirtyy kytkennässä vasemmalta oikealle. [1]



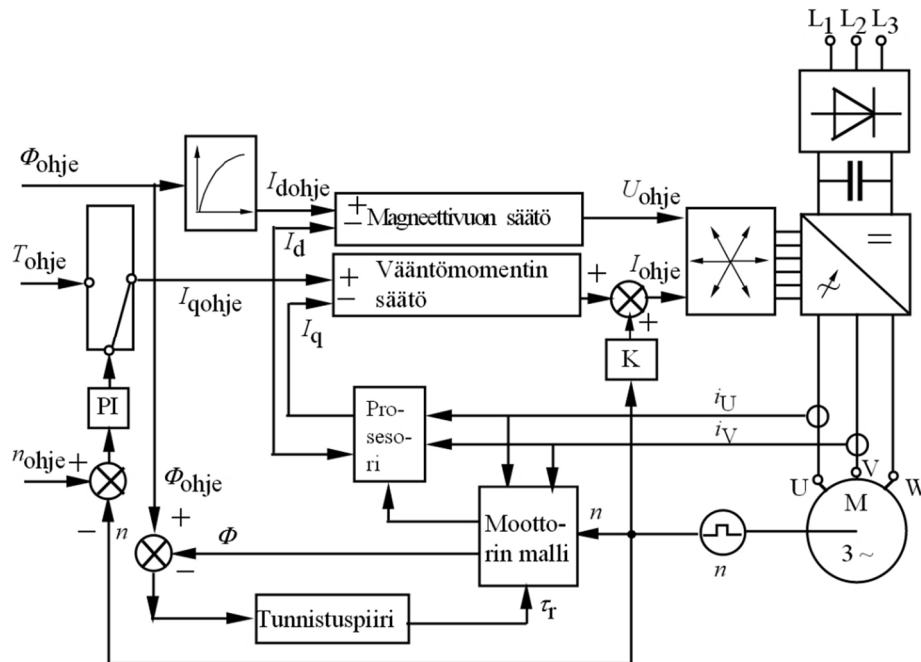
Kuva 4. Tasasähkökatkojan toimintaperiaate sekä lähtöjännitteen ja -virran käyrämuoto (muokattu lähteestä [1])

2.3 Virtatiedon käyttö

2.3.1 Virtatiedon käyttö moottorisäädössä

Moottorisäätö on säätöjärjestelmä, jonka tehtävänä on säätää moottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta halutuksi. Säädössä moottorin lähtösuureita verrataan ohjearvoihin, ja näiden erotuksen, eli säätöpoikkeaman, perusteella muutetaan moottorin ohjaussignaaleja siten että säätöpoikkeama pienenee. Tämä vaatii lähtö- eli säätösuureiden mittausta ja takaisinkytkentää. Yksi moottorisäädössä käytettävistä säätösuureista on moottorin virta. Moottorin virtatietoa tarvitaan esimerkiksi vektorisäädössä sekä suorassa vääntömomenttisäädössä (DTC).

Vektorisäätö, jonka lohkokaavio on esitetty kuvassa 5, mahdollistaa moottorin nopeuden ja vääntömomentin säädön. Se edellyttää vääntömomentin ja käämivuon oloarvojen estimointia sekä muuttujan ohjauksen määrittämistä moottorin vektoryhtälöihin perustuen. Vektorisäädössä staattorivirtojen i_U ja i_V sekä pyörimisnopeuden mittaussignaalit syötetään oikosulkumoottorin matemaattiseen malliin. Malli laskee moottorin magneettivuon ja muuttaa vaihevirrat kaksivaihetasoon. Staattorivirta jaetaan pitkittaiseen I_d ja poikittaiseen I_q komponenttiin, jotka syötetään vääntömomentin ja magneettivuon säätölohkoille. Pitkittäinen virtakomponentti I_d on moottoria magneetoiva osa, ja poikittainen virtakomponentti I_q saa aikaan moottorin vääntömomentin. Vääntömomentin ja magneettivuon säätölohkoilta saadut ohjearvot syötetään modulaattorille, joka ohjaa kytkinkomponentteja. [1][3]



Kuva 5. Vektorisäädön lohkokaavio [3]

Matemaattisesti esitettynä oikosulkumoottorin staattorikäämivuo

$$\Psi_s = \int (\mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt \quad (4)$$

missä \mathbf{u}_s , R_s ja \mathbf{i}_s ovat staattorikäämin jännitevektori, resistanssi ja virtavektori. Jännitevektori lasketaan tasajännitevälipiirin jännitteestä ja kytkinten tiloista, ja resistanssi määritetään syöttämällä staattoriin tasavirtaa ja mittaamalla jännitehäviö. Staattorivirtavektori \mathbf{i}_s voidaan määrittää staattorikoordinaatistossa muodossa

$$\mathbf{i}_s = \frac{2}{3} \left[i_a + i_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + i_c e^{\frac{j4\pi}{3}} \right] \quad (5)$$

missä i_a , i_b ja i_c ovat moottorivaiheiden virtojen hetkellisarvot ja e on neperin luku. Moottorin kolmas vaihevirta voidaan laskea kahden muun vaihevirran avulla, sillä symmetriselle kolmivaihejärjestelmälle

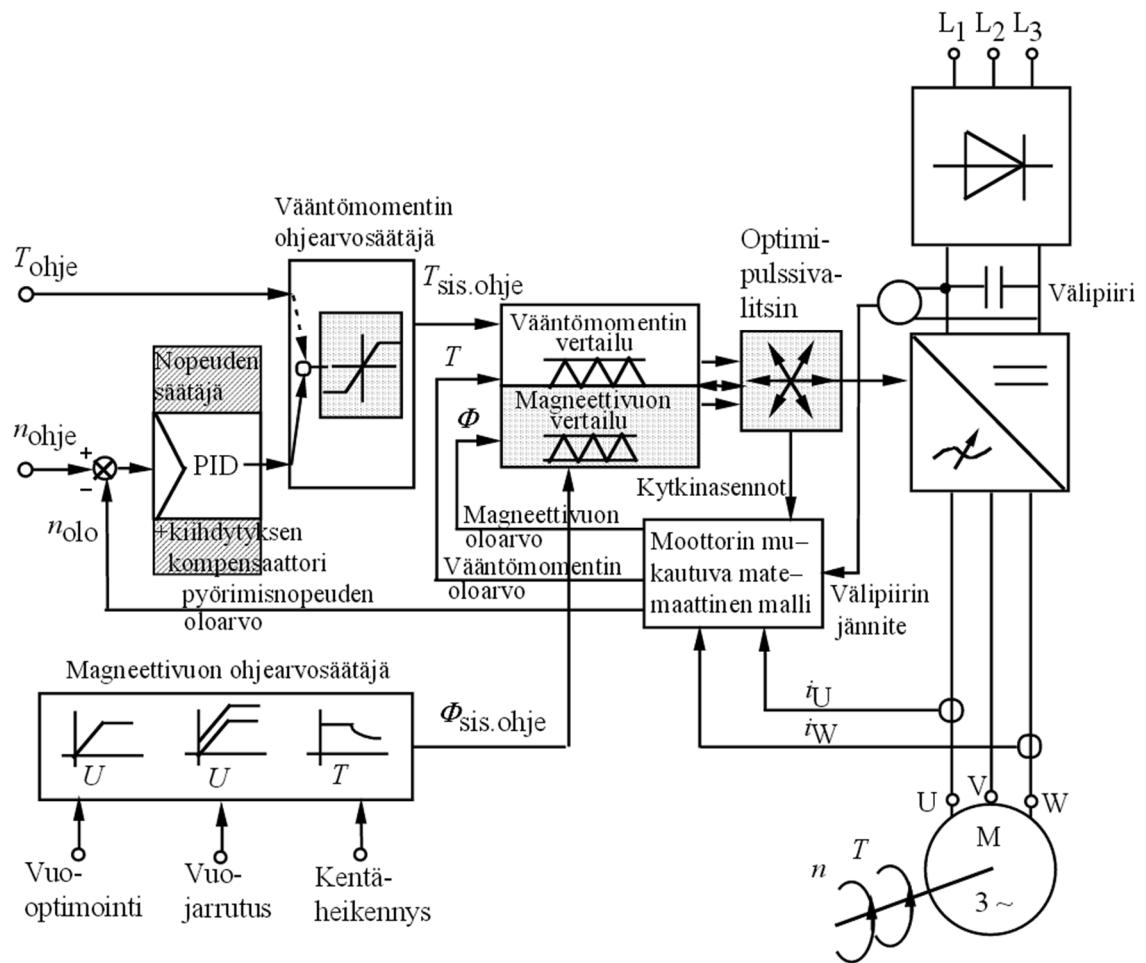
$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (6)$$

Oikosulkumoottorin vääntömomentti on

$$T_e = \frac{3}{2} p \text{Im}\{\Psi_s^* \mathbf{i}_s\} \quad (7)$$

missä p on moottorin napapariiluku ja Ψ_s^* staattorikäämivuon kompleksikonjugaatti. [1][2][3]

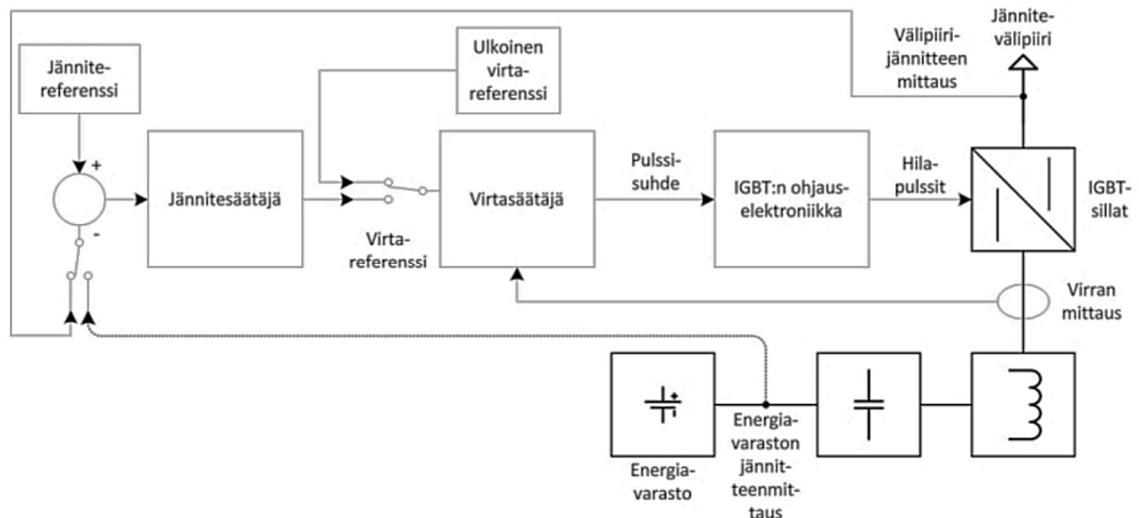
Suora vääntömomenttisäätö, jonka lohkokaavio on esitetty kuvassa 6, vaikuttaa suoraan moottorin vääntömomenttiin ja magneettivuohon. Siinä moottorin mukautuva matemaattinen malli laskee magneettivuon ja vääntömomentin oloarvot moottorin virran ja tasajännitevälipiirin jännitteen avulla. Vääntömomentin ja magneettivuon vertailupiirit vertailevat oloarvoja vääntömomentin ja magneettivuon ohjearvosäätäjiltä saatuihin ohjearvoihin. Optimipulssivalitsin valitsee parhaiten haluttua toimintatilaa vastaavan kytkentävektorin vertailupiireiltä saamiensa magneettivuon ja vääntömomentin arvojen perusteella. [3]



Kuva 6. Suoran vääntömomenttisäädön (DTC) lohkokaavio [3]

2.3.2 Virtatiedon käyttö tasasähkökatkojen säädössä

Virtasäädöllä ohjatussa tasasähkökatkojassa virtatietoa käytetään transistorien ohjaamiseen. Kuvassa 7 on esitetty tasasähkökatkojen virtasäädön lohkokaavio. Tässä tapauksessa tasasähkökatkojaa käytetään energiavaraston, eli esimerkiksi akun, lataamisessa. Toimintatilasta riippuen jännitesäätäjä mittaa jännitettä joko välipiiristä tai energiavarastosta ja muodostaa ohjearvon virtasäätäjälle. Virtasäätäjä voi saada virtaohjearvon jännitesäätäjän lisäksi myös ulkoisesta lähteestä. Virtasäätäjän mittaaman virran ja ohjearvovirran perusteella virtasäätäjä muodostaa pulssisuhteen, jonka perusteella transistorien ohjauselektronikka ohjaa transistoreja. [4]



Kuva 7. Tasasähkökatkojan virtasäädön lohkokkaavio [4]

2.3.3 Virtatiedon käyttö valvonta- ja suojaustoiminnoissa

Virtanmittausta käytetään valvonta- ja suojaustoiminnoissa, jotta voidaan estää erilaisten vikailmiöiden aikaansaamat vahingot. Suojaustoimintoja ovat muun muassa oikosulku-, ylivirta- ja maasulkusuojaus. Oikosulkusuojausta käytetään suurten vikavirtojen havaitsemiseen, ja sen kriittinen tekijä on nopeus. Sitä käytetään esimerkiksi moottorivaiheiden oikosulkusuojauksessa, jossa sen tehtävänä on havaita moottorivaiheiden välillä tapahtuvan oikosulun seurauksena aiheutuva vikavirran kasvu ja pysäyttää laitteen toiminta. Ylivirtasuojauksen tehtävänä on havaita pienemmät ylivirrat kuin oikosulkusuojauksessa. Sen kriittinen tekijä on tarkkuus, ja sen toiminta on oikosulkusuojausta hitaampi. Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa mittaamalla virta kolmesta moottorivaiheesta. Mikäli kolmen moottorivaiheen summavirta eroaa nolasta, on kyseessä maasulkuvika, jolloin maasulkusuojaus pysäyttää laitteen toiminnan. [2]

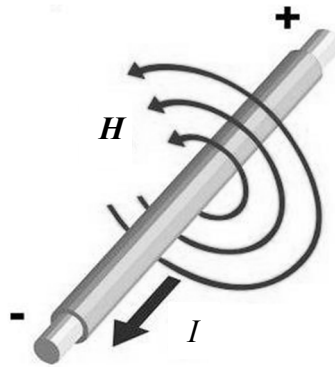
3. SÄHKÖMAGNETISMI

3.1 Sähkömagneettinen induktio

Ampèren lain mukaisesti johtimessa kulkeva sähkövirta I muodostaa johtimen ympärille magneettikentän H , jota mitataan SI-järjestelmässä yksiköllä ampeeri per metri (A/m). Magneettikentän suunta on niin sanotun oikean käden säännön mukainen, eli myötäpäivään virran kulkusuuntaan katsottaessa, kuvan 8 osoittamalla tavalla. Laki voidaan esittää matemaattisesti yhtälöllä

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc} \quad (8)$$

missä H on magneettikentän voimakkuus, $d\mathbf{l}$ on äärellisen pieni alkio suljetusta käyrästä C , I_{enc} on käyrän C rajoittaman pinnan lävistävien virtojen summa ja \oint_C on polkuintegraali suljettua käyrää C pitkin. Yhtälön mukaan magneettikentän voimakkuuden H polkuintegraali käyrän C ympäri on sama kuin käyrän C rajoittaman pinnan lävistävien virtojen summa. [5]



Kuva 8. Ampèren laki (muokattu lähteestä [6])

Lineaarisessa väliaineessa magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välillä on yhteys väliaineyhtälön

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (9)$$

mukaisesti, missä B on magneettivuon tiheys, μ permeabiliteetti ja H magneettikentän voimakkuus. Magneettivuon tiheyttä mitataan SI-järjestelmässä yksiköllä tesla (T), mutta yksikkönä voidaan käyttää myös cgs-järjestelmään perustuvaa gaussia (G tai Gs).

Yksiköiden välinen suhde voidaan ilmaista muodossa $1 \text{ T} = 10000 \text{ G}$. Permeabiliteetti μ riippuu sekä tyhjiön permeabiliteetista μ_0 ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$) että materiaalin suhteellisesta permeabiliteetista μ_r yhtälön

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (10)$$

osoittamalla tavalla. [5]

Yhdistämällä yhtälöt 8, 9 ja 10, magneettivuon tiheyden \mathbf{B} ja johtimessa kulkevan virran I välille saadaan yhteys

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \mu_r I_{enc} = \mu_0 \mu_r NI \quad (11)$$

missä N on käyrän C rajoittaman pinnan lävistävien johtimien lukumäärä.

Magneettivuon tiheys \mathbf{B} kuvaa tasopinnan A lävistävää magneettivuota, joten magneettivuo Φ saadaan magneettivuon tiheyden \mathbf{B} pintaintegraalina

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (12)$$

Toinen laki, joka Ampèren lain lisäksi kuvaa johtimessa kulkevan sähkövirran ympärilleen muodostamaa magneettikenttää, on Biot-Savartin laki. Sen mukaan

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} \quad (13)$$

missä $d\mathbf{l}$ virta-alkion differentiaalinen pituusvektori, \mathbf{r} on yksikkövektori virta-alkiosta tarkasteltavaan magneettikentän pisteeseen ja r on etäisyys virta-alkiosta tarkasteltavaan magneettikentän pisteeseen.

Magneettivuon tiheydeksi B etäisyydellä r äärettömän pitkstä suorasta johtimesta saadaan yhtälöstä 13 johtamalla

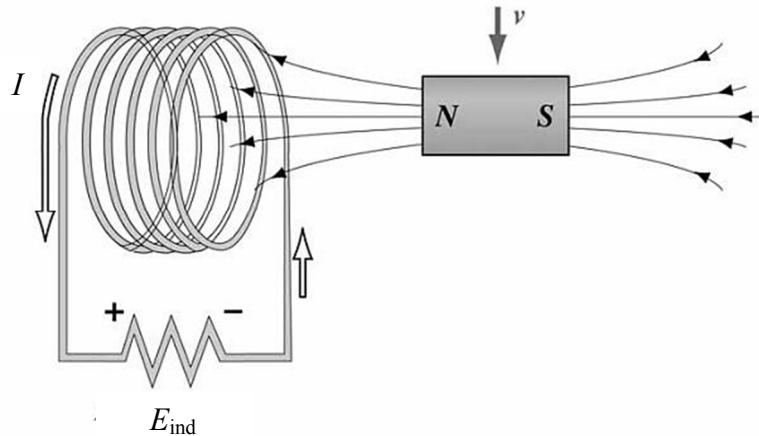
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (14)$$

Biot-Savartin lain mukaan magneettivuon tiheys on kääntäen verrannollinen tarkastelupisteen etäisyyteen johtimesta.

Ampèren laki osoittaa, että johtimessa kulkeva sähkövirta muodostaa magneettikentän johtimen ympäri. Faradayn laki osoittaa tämän toimivan myös käänteisesti, eli johdinsilmukan läpäisevä muuttuva magneettivuo indusoi johtimen päiden välille jännitteen

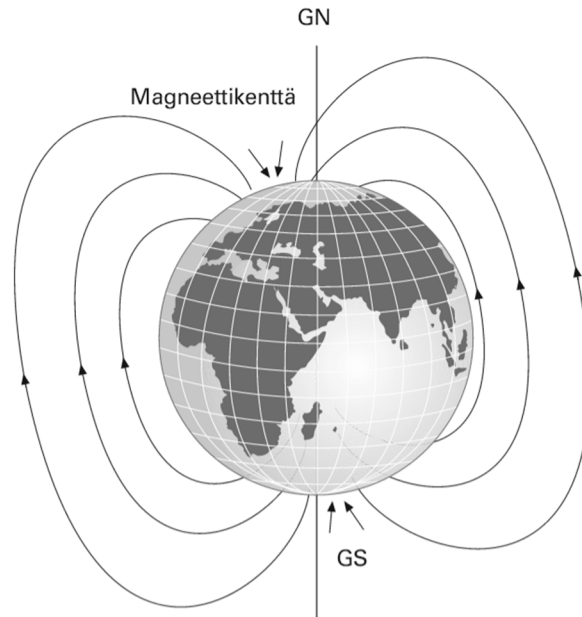
$$E_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (15)$$

missä E_{ind} on johtimen päiden välille indusoitunut jännite, N on johdinkierrosten lukumäärä ja $-\frac{d\Phi}{dt}$ on magneettivuon muutos ajan suhteen. Kuvassa 9 on esitetty tämä tilanne. Siinä kestopagneettia siirretään ylhäältä alaspäin nopeudella v johdinsilmukkaan nähden. Kestomagneetin aikaansaama johdinsilmukan läpäisevä magneettivuo muuttuu ja indusoi vastuksen yli jännitteen E_{ind} . Suljetussa silmukassa indusoituneen jännitteen E_{ind} aikaansaama sähkövirta I pyrkii vastustamaan ulkoisen magneettikentän muutosta. [5]



Kuva 9. Faradayn laki (muokattu lähteestä [7])

Virtajohtimen ympärilleen muodostaman magneettivuon tiheyden suuruutta voidaan havainnollistaa maapallon ympärilleen luoman magneettivuon tiheyden avulla. Maapalloa ympäröi lähes staattinen magneettikenttä, joka syntyy maapallon pyörimisen seurauksena sen ytimeen muodostuvista sähkövirroista. Magneettivuon tiheys maan pinnalta mitattuna on noin $60 \mu\text{T}$ ($0,6 \text{ G}$) pohjois- ja etelänavoilla ja noin $30 \mu\text{T}$ ($0,3 \text{ G}$) päiväntasaajalla. Navoilla magneettivuo kaareutuu kohtisuoraan maan pintaa vasten ja päiväntasaajalla se on maanpinnan suuntainen kuvan 10 mukaisella tavalla. [8]



Kuva 10. Maapallon magneettikenttä [9]

Maapallon ympärilleen luoman magneettivuon tiheys

$$B = H_E \left(\frac{R}{r} \right)^3 \cdot \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (16)$$

missä H_E on magneettivuon tiheyden vaakasuora komponentti päiväntasaajalla, R maapallon säde ($R \approx 6500$ km), r etäisyys maapallon keskipisteestä ja θ kulma suhteessa pyörimisakseliin (navoilla $\theta = 0^\circ$ ja päiväntasaajalla $\theta = 90^\circ$). [8]

Biot-Savartin lain (yhtälö 14) mukaan 3 A virran 10 mm etäisyydelle äärettömän pitkstä johtimesta aikaansaama magneettivuontiheys

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}) \cdot 3,0 \text{ A}}{2\pi \cdot 0,01 \text{ m}} = 60 \mu\text{T} \quad (17)$$

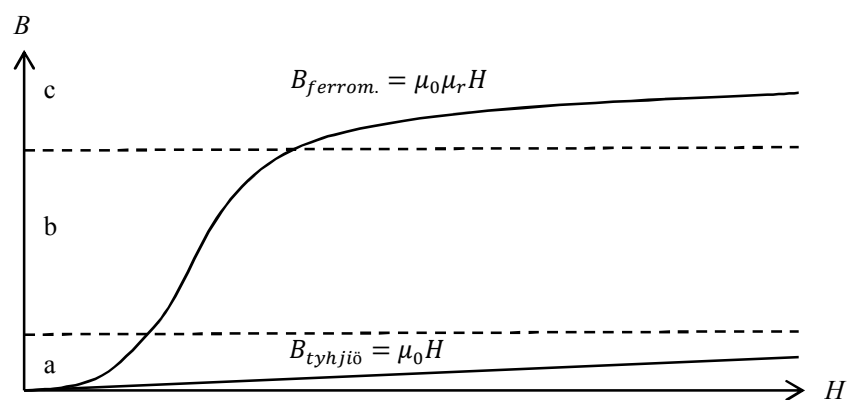
vastaa maapallon navoilla olevaa magneettivuontiheyttä.

3.2 Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen

Erilaiset aineet muuttavat magneettikenttää, ja ne luokitellaan magneettikentän muutoksen mukaan dia-, para- ja ferromagneettisiksi aineiksi. Dia- ja paramagneettiset aineet muuttavat magneettikenttää erittäin vähän, joten käytännössä niillä ei ole merkitystä. Ferromagneettisilla materiaaleilla, joihin kuuluu muun muassa rauta, on suuri permeabiliteetti. Toisin kuin para- ja diamagneettisilla aineilla, permeabiliteetti ei

kuitenkaan ole vakio vaan riippuu magneettivuon tiheydestä [10]. Ferromagneettisilla materiaaleilla atomien välinen vuorovaikutus pyrkii kääntämään magneettimomentit samansuuntaisiksi myös silloin kun kappale ei ole ulkoisessa magneettikentässä. Tämä muodostaa atomin kokoon nähden suuria alueita, joilla magneettimomentit ovat keskenään samansuuntaisia. Näitä alueita kutsutaan Weissin alueiksi ja niiden välisiä rajoja Blochin seinämiksi. Eri Weissin alueiden magneettimomentit, ja siten myös magneettikentät, ovat erisuuntaisia, jolloin ne kumoavat toisensa ja materiaalin ei havaita olevan ulkoisesti magneettinen. Heikossa ulkoisessa magneettikentässä Weissin alueet, jotka ovat suuntautuneet ulkoisen magneettikentän suuntaisiksi, alkavat kasvaa vastakkaissuuntaisten alueiden kustannuksella. Blochin seinämät siirtyvät vain hieman alkuperäisestä asennostaan. Mikäli ulkoinen magneettikenttä poistettaisiin, seinämät siirtyisivät takaisin alkuperäiseen asentoon. Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvu saa Blochin seinämät siirtymään pois alkuperäisestä asennosta niin paljon, että poistettaessa ulkoinen magneettikenttä seinämät eivät enää palaisi alkuperäiseen asentoon. Tällaista Blochin seinämien liikkumista kutsutaan Barkhausenin hyppäyksiksi. Kun ulkoisen magneettikentän voimakkuus kasvaa riittävästi, poikittaissuunnassa ulkoista magneettikenttää vasten olevat Weissin alueet kiertyvät ulkoisen magneettikentän suuntaisiksi. Kun kaikki kappaleen magneettimomentit ovat suuntautuneet ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi, materiaali kyllästyy. Materiaalin kyllästyessä sen magneettivuon tiheys kasvaa lineaarisesti tyhjiön permeabiliteettia vastaavalla arvolla. [11]

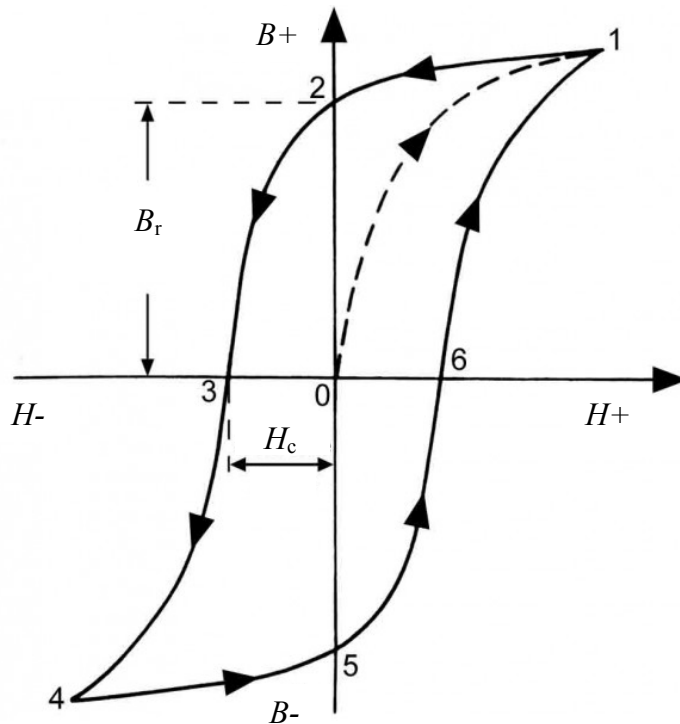
Kuvassa 11 on esitetty ferromagneettisen materiaalin ja tyhjiön magnetoitumiskäyrät eli materiaalien magneettivuon tiheydet magneettikentän voimakkuuden funktiona. Kuvassa näkyy kolme eri vaihetta. Vaiheessa a) tapahtuu palautuvia muutoksia, jonka jälkeen ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvaessa vaiheessa b) tapahtuu Barkhausenin hyppäyksiä eli palautumattomia muutoksia. Viimeisessä vaiheessa c) tapahtuu Weissin alueiden kiertyminen ja materiaalin kyllästyminen. [11]



Kuva 11. Ferromagneettisen materiaalin ja tyhjiön magnetoitumiskäyrät

3.3 Hystereesi

Materiaalin magneitoitumista kuvaa BH-käyrä eli hystereesisilmukka. Hystereesisilmukka esittää graafisesti magneettisen materiaalin vuontiheyden B magneettikentänvoimakkuuden H funktiona. Kuvassa 12 on esimerkki ferromagneettisen materiaalin hystereesikäyrästä.



Kuva 12. Ferromagneettisen materiaalin hystereesikäyrä (muokattu lähteestä [12])

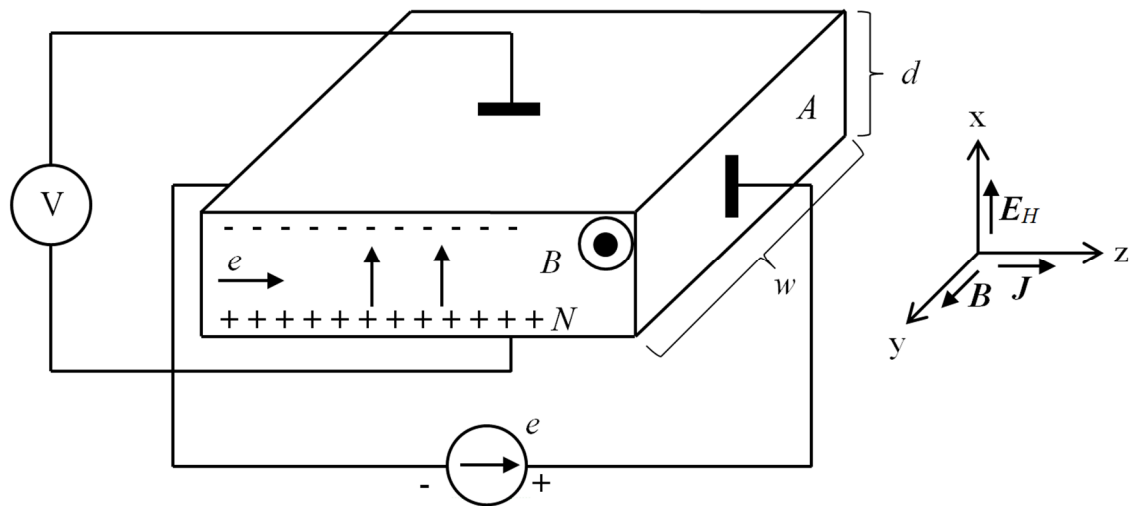
Kuvassa 12 katkoviivalla esitetty polku pisteestä 0 pisteeseen 1 on magneettisen materiaalin magneitoitumiskäyrä, jota tarkasteltiin luvussa 3.2. Kun ulkoinen magneettikenttä H poistetaan materiaalin ollessa täysin kyllästynyt pisteessä 1, magneettivuon tiheys ei pienene nollaan vaan materiaaliin jää jäljelle jäännös- eli remanenssivuon tiheys B_r . Kuvassa remanenssivuon tiheyttä vastaa piste 2. Jotta remanenssivuon tiheys saataisiin poistettua ja vuontiheys pienennettyä nollaan, materiaalia on magneitoitava negatiiviseen suuntaan magneettikentän voimakkuudella $-H_c$. Tätä arvoa kutsutaan koersitiivikentän voimakkuudeksi, ja kuvassa sitä vastaa piste 3. Jatkettaessa materiaalin magneitoimista negatiiviseen suuntaan saavutetaan piste 4, joka on pisteestä 1 vastaava negatiivinen kyllästysvuon tiheys. Kun materiaalia lähdetään magnetoimaan takaisin kohti nollaa pisteestä 4, saavutetaan piste 5. Tässä pisteessä magneettivuon tiheys vastaa remanenssivuon tiheyttä B_r negatiivisena. Tämä negatiivinen remanenssivuon tiheys $-B_r$ saadaan poistettua magnetoimalla materiaalia

positiiviseen suuntaan koersitiivikentän voimakkuutta H_c vastaavalla arvolla, jolloin saavutaan pisteeseen 6. Kun ulkoista magneettikenttää kasvatetaan, saavutaan jälleen pisteeseen 1. Tätä ilmiötä, jossa magneettivuon tiheys ei riipu magneettikentän voimakkuudesta alkuperäisen magnetoitumiskäyrän (käyrä pisteestä 0 pisteeseen 1) mukaisesti, kutsutaan hystereesiksi. [10]

4. HALL-ILMIÖ

Hall-ilmiön löysi yhdysvaltalainen fyysikko Edwin H. Hall (1855 - 1938) vuonna 1897 tutkiessaan aineiden sähkönjohtavuutta. Hall havaitsi, että asetettaessa levyn muotoinen virtajohdin kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään, johtimen reunojen välille syntyy jännite kohtisuoraan sekä magneettikenttää että sähkövirran kulkusuuntaa vastaan. [13] Tätä jännitettä kutsutaan Hall-jännitteeksi, ja sen suuruus riippuu sekä magneettivuon tiheydestä että johtimessa kulkevan virran suuruudesta.

Hall-elementti on johteesta tai puolijohteesta valmistettu liuska. Kuva 13 esittää n-tyypin puolijohteesta valmistetun Hall-elementin perusrakenteen, jossa elektronit ovat enemmistövaraustenkuljettajina. Liuska asetetaan kohtisuoraan homogeenista magneettikenttää vastaan kuvan mukaisella tavalla, jolloin magneettikenttä vaikuttaa positiivisen y-akselin suuntaisesti. Liuskan päiden välille kytketty jännitelähde saa aikaan Ohmin lain mukaisesti käyttöjännitteestä ja elementin ominaisresistanssin suuruudesta riippuvan ohjausvirran, jonka virrantiheys \mathbf{J} on. Tämä ohjausvirta on elektronien liikettä z-akselin suuntaisesti vasemmalta oikealle. [13][14]



Kuva 13. Hall-elementin rakenne

Y-akselin suuntainen magneettikenttä kohdistaa varaustenkuljettajiin, eli n-tyypin puolijohteessa elektroneihin, voiman, jota kutsutaan Lorentz-voimaksi. Lorentz-voima

$$\mathbf{F}_L = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (18)$$

missä e on elektronin varaus, v elektronin nopeus ja B magneettivuon tiheys. Tämä voima on oikean käden säännön mukaisesti positiivisen x-akselin suuntainen ja poikkeuttaa elektroneja liuskan yläreunaa kohti. Elektronien tihentymä liuskan yläreunalla saa aikaan virtaa ja magneettikenttää vastaan kohtisuoran sähkökentän E_H , jota kutsutaan Hall-kentäksi. Hall-kenttä vuorostaan saa aikaan Lorentz-voimalle vastakkaisuuntaisen Hall-voiman [14]

$$\mathbf{F}_H = e\mathbf{E}_H \quad (19)$$

Kun sähkökenttä E_H on riittävän suuri, saavutetaan tasapainotilanne, missä

$$F_H = F_L \quad (20)$$

Tasapainotilanteessa elektronit etenevät suoraan z-akselin suuntaisesti, koska sähkökentän aiheuttama voima kumoaa magneettikentän aiheuttaman voiman. Tasapainotilanteessa elektronien nopeusvektori \mathbf{v} ja magneettivuon tiheysvektori \mathbf{B} ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, joten edellinen yhtälö voidaan esittää muodossa [14]

$$eE_H = evB \quad | : e \quad (21)$$

$$E_H = vB \quad (22)$$

Hall-kenttä E_H voidaan esittää muodossa

$$E_H = \frac{U_H}{d} \quad (23)$$

missä U_H on Hall-jännite ja d on liuskan korkeus.

Ohjausvirta I voidaan lausua yhtälöllä

$$I = JA = nevA = nev dw \quad (24)$$

missä n on varaustenkuljettajien lukumäärä tilavuusyksikköä kohti, A liuskan poikkileikkauksen pinta-ala ja w liuskan leveys.

Yhtälöstä 24 saadaan elektronien nopeudeksi

$$v = \frac{I}{nedw} \quad (25)$$

Yhdistämällä yhtälöt 22, 23 ja 25, saadaan Hall-jännitteeksi

$$\frac{U_H}{d} = \frac{IB}{nedw} \quad | \cdot d \quad (26)$$

$$U_H = \frac{IB}{new} = \frac{R_H IB}{w} \quad (27)$$

missä R_H on Hall-elementin materiaalista riippuvainen Hall-vakio [14]

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (28)$$

Yhtälön 27 mukaan Hall-jännite U_H on suoraan verrannollinen ympäröivään magneettivuon tiheyteen B , kun ohjausvirta I on vakio. Käytännössä Hall-jännite poikkeaa hieman yhtälön antamasta tuloksesta magneettivuon tiheyden B ollessa nolla. Tämä poikkeama on nimeltään Hall-elementin nollapistejännite U_{0H} . Kun nollapistejännite otetaan huomioon, saadaan Hall-jännitteeksi [4]

$$U_H = \frac{R_H IB}{w} + U_{0H} \quad (29)$$

5. VIRTA-ANTURIEN SUORITUSKYKY

Virta-anturien suorituskykyä kuvataan useilla eri ominaisuuksilla, jotka mahdollistavat anturien keskinäisen vertailun. Nämä ominaisuudet vaikuttavat anturien mittaustarkkuuteen sekä mittausten luotettavuuteen ja siten soveltuvuuteen eri käyttökohteisiin. Anturien suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet voidaan karkeasti jakaa staattisiin ja dynaamisiin ominaisuuksiin. Staattiset ominaisuudet kuvaavat anturien ominaisuuksia tilanteessa, jossa muutosilmiöt ovat stabiloituneet lopulliseen tilaan. Ne kertovat esimerkiksi kuinka paljon anturin ulostulo muuttuu sisäänmenon muuttuessa tai mikä on pienin muutos sisäänmenossa, joka näkyy ulostulossa. Dynaamiset ominaisuudet kuvaavat anturien ominaisuuksia muutostilanteessa. Ne kertovat muun muassa millä nopeudella ulostulo muuttuu vastaamaan sisäänmenoa. [15]

5.1 Staattista suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet

5.1.1 Vahvistus

Virta-anturin vahvistus, eli herkkyys, ilmaisee kuinka paljon anturin ulostulo muuttuu mitattavan virran muuttuessa. Se määritellään anturilla mitatun virran i_m muutoksen suhteena todellisen virran i_p muutokseen eli $\Delta i_m / \Delta i_p$. Kuvaajassa, jossa anturilla mitattu virta i_m esitetään todellisen virran i_p funktiona, vahvistus on suoran kulmakerroin. Yleensä halutaan käyttää mahdollisimman suurta anturin vahvistusta, koska se mahdollistaa pienten magneettikentän voimakkuuksien havaitsemisen. Se kasvattaa myös anturin ulostulotasoa, joten usein riittää yksinkertaisempi sekä edullisempi lähtöasteen elektroniikka verrattuna tilanteeseen, jossa käytetään pienempää anturin vahvistusta [16]. Vahvistus voi olla vakio tai se voi vaihdella anturin mittausalueella. Vahvistukseen liittyviä virheitä käsitellään luvuissa 5.1.4 ja 5.1.5.

5.1.2 Virranmittausalue

Virranmittausalue on yksi rajoittavimmista tekijöistä valittaessa sopivaa virta-anturia, sillä se määrittää anturilla mitattavan maksimivirran. Virta-anturien virranmittausalue ilmaistaan yleensä sekä jatkuvana virranmittausalueena että

maksimivirranmittausalueena. Jatkuva virranmittausalue määrittää nimensä mukaisesti maksimivirran, jota anturilla voidaan jatkuvasti mitata, ja se on riippuvainen anturin häviöistä. Maksimivirranmittausalue määrittää maksimivirran, jota anturilla voidaan hetkellisesti mitata. Tämän maksimivirran jatkuvaa mittaamista rajoittaa yleensä anturin ylikuumeneminen, kuten esimerkiksi sunttivirta-anturin tapauksessa. Magneettisen sydänmateriaalin sisältävän Hall-anturin tapauksessa maksimivirranmittausaluetta puolestaan rajoittaa magneettisen materiaalin pysyvä kyllästyminen, jonka riittävän suuren virran muodostama magneettikenttä saa aikaan. Virta-anturi voi sietää sille määriteltäviä maksimivirtaa suurempiakin virtoja eikä välttämättä tuhoudu. Mittauksissa voi kuitenkin olla epälineaarisuutta, tai anturin saturoituminen voi saada aikaan pysyvän poikkeaman mittaustuloksiin, jolloin mittaustulokset eivät ole luotettavia. Virta-anturin maksimivirranmittausalue riippuu yleensä anturin käyttöjännitteestä ja ulostulojännitteestä sekä suljetun magneettipiirin Hall-anturin tapauksessa magneettisen materiaalin lineaarisesta käyttöalueesta.

5.1.3 Nollapistepoikkeama

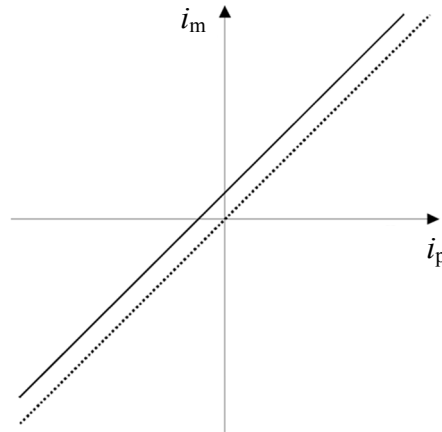
Nollapistepoikkeama määritellään virta-anturilla mitatun virran poikkeamisena nolasta, kun virta-anturilla mitattava todellinen virta on nolla. Kuva 14 esittää virta-anturilla mitatun virran i_m käyttäytymistä todellisen virran i_p funktiona. Katkoviivalla esitetty käyrä kuvaa ideaalisella virta-anturilla mitattua virtaa ja yhtenäisellä viivalla esitetty käyrä todellisella virta-anturilla mitattua virtaa. Ideaalisen virta-anturin mittauskäyrä kulkee origon kautta, ja sen mittaama virta vastaa aina todellista virtaa eli

$$i_m(i_p) = i_p \quad (30)$$

Todellisen virta-anturin mittauskäyrä on samansuuntainen ideaalisen virta-anturin mittauskäyrän kanssa, eli vahvistus on sama, mutta se ei kulje origon kautta. Nollapistepoikkeamassa todellisen virta-anturin mittauskäyrän poikkeaman suuruus ideaalisen virta-anturin mittauskäyrästä on sama koko mittausalueella, joten se voidaan esittää vakiovirheenä yhtälössä eli

$$i_m(i_p) = i_p + \Delta I_p \quad (31)$$

missä ΔI_p on mittausvirhe eli nollapistepoikkeama. Nollapistepoikkeama on yleensä helppo kompensoida, koska sen suuruus pysyy samana koko mittausalueella. Haasteita kompensointiin tuo se, että nollapistepoikkeama vaihtelee yleensä lämpötilan mukaan ja samanlaisten virta-anturien kesken. [4][17]



Kuva 14. Virta-anturin nollapistepoikkeama (muokattu lähteestä [17])

5.1.4 Vahvistusvirhe

Vahvistusvirhe on poikkeama ideaalisen virta-anturin vahvistuksesta eli ideaalisen virta-anturin mittauskäyrän kulmakertoimesta. Kuva 15 esittää virta-anturin vahvistusvirhettä. Se kuvaa virta-anturilla mitattua virtaa i_m todellisen virran i_p funktiona. Kuvassa on esitetty sekä ideaalisen anturin (katkoviivalla) että todellisen anturin mittauskäyrä (yhtenäisellä viivalla). Ideaalisen virta-anturin mittauskäyrä kulkee origon kautta, ja sen mitaama virta vastaa aina todellista virtaa eli

$$i_m(i_p) = i_p \quad (32)$$

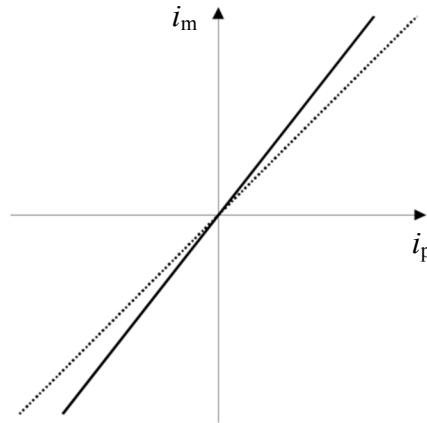
Todellisen virta-anturin mittauskäyrä kulkee myös origon kautta, mutta sen kulmakerroin poikkeaa ideaalisen virta-anturin mittauskäyrästä. Todellisen virta-anturin mittauskäyrän poikkeaman suuruus ideaalisen virta-anturin mittauskäyrästä ei ole sama koko mittausalueella, kuten nollapistepoikkeamassa, vaan riippuu todellisesta virrasta i_p . Tämä poikkeama voidaan esittää vahvistusvirheenä yhtälössä eli

$$i_m(i_p) = i_p + G_e i_p \quad (33)$$

missä G_e on vahvistusvirhekerroin ja $G_e i_p$ on vahvistusvirhe. Kun nollapistepoikkeama lisätään vahvistusvirheeseen, saadaan yhtälö

$$i_m(i_p) = i_p + G_e i_p + \Delta I_p \quad (34)$$

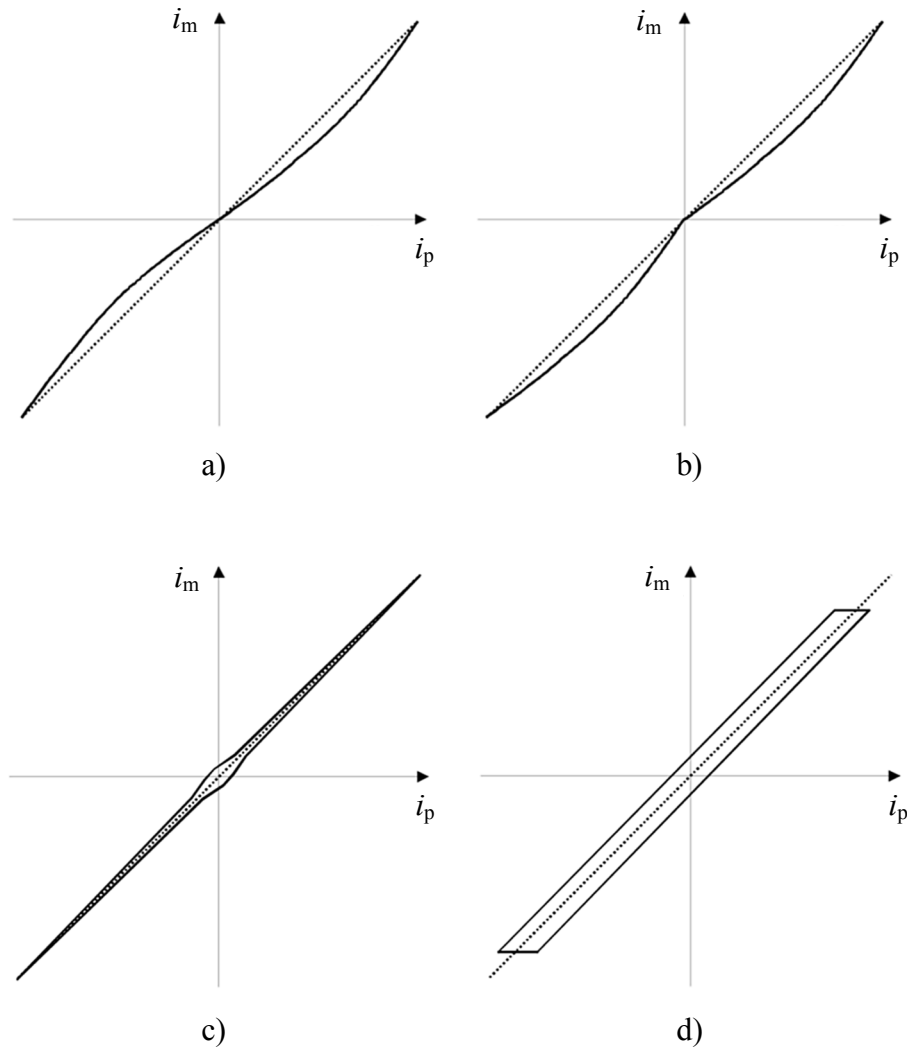
Vahvistusvirhe vaihtelee yleensä lämpötilan mukaan samoin kuin nollapistepoikkeama. [4]



Kuva 15. Virta-anturin vahvistusvirhe (muokattu lähteestä [17])

5.1.5 Epälineaarisuus

Virta-anturin lineaarisuus kertoo kuinka suora mitatun virran i_m käyrä on, kun todellinen virta i_p muuttuu lineaarisesti. Vaikka analogisia antureita pidetään yleensä lineaarisina, mikään anturi ei todellisuudessa ole täysin lineaarinen. Epälineaarisuus, eli lineaarisuusvirhe, ilmaistaan yleensä maksimipoikkeamana ideaalisesta tai sovitetusta suorasta, ja se esitetään prosentteina mittausalueen maksimivirrasta. Tämä ei kuitenkaan tarkasti kuvaa virta-anturin lineaarisuutta vaan kertoo ainoastaan toleranssin, jonka sisällä poikkeama suorasta on. Tarkempaa tietoa epälineaarisuudesta antaa epälineaarisuuskäyrän muoto. Kuvassa 16 on esitettynä neljä tyypillistä virta-anturin epälineaarisuuskäyrää. Katkoviiva kuvaa ideaalista suoraa ja yhtenäinen viiva mitattua virtaa i_m . Epälineaarisuus voidaan jakaa integraaliseen ja differentiaaliseen epälineaarisuuteen. [17]



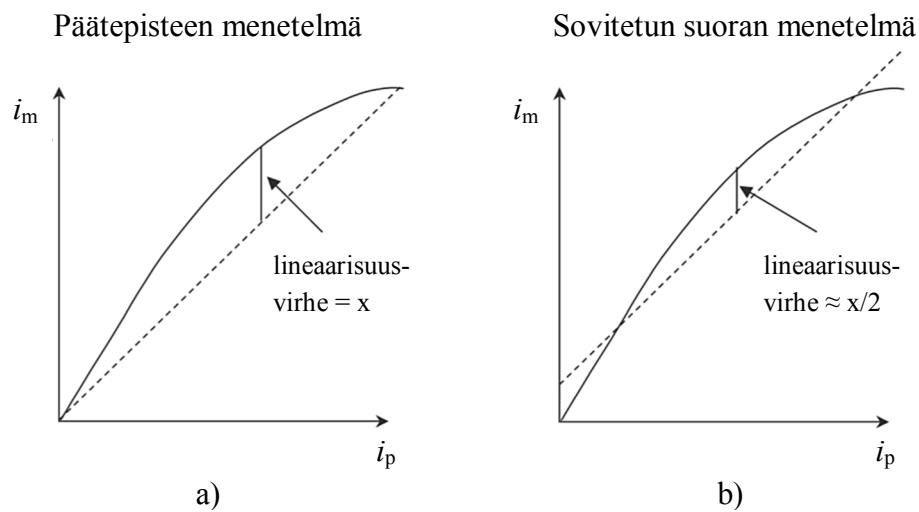
Kuva 16. Tyypillisiä virta-anturin epälineaarisuuskäyriä (muokattu lähteestä [17])

Kuvan 16 epälineaarisuuskäyrät a) ja b) kuvaavat integraalista epälineaarisuutta. Integraaliselle epälineaarisuudelle on tyypillistä lineaarisuusvirheen asteittainen kasvu siten että lineaarisuusvirhe alkaa kasvaa siirryttäessä nolasta mittausalueen puoliväliä kohti. Lineaarisuusvirhe saavuttaa suurimman arvonsa mittausalueen puolivälissä, jonka jälkeen se alkaa pienentyä mittausalueen loppua kohti siirryttäessä. Tilanne ei kuitenkaan aina ole tällainen. Integraalinen epälineaarisuus on eräänlainen vahvistusvirhe, jossa vahvistuskertoimen ei ole vakio vaan vaihtelee mittausalueella. Se voidaan esittää muodossa

$$i_m(i_p) = i_p + g_e(i_p) \quad (35)$$

missä $g_e(i_p)$ on todellisen virta-anturin mittauskäyrän poikkeama määritetystä suorasta. Suoran määrittelyyn on olemassa kaksi yleistä tapaa: päätepisteen menetelmä (end point) ja sovitetun suoran menetelmä (best fit straight line). Päätepisteen menetelmässä

poikkeama mitataan mittauskäyrän päätepisteiden välille piirretyn ideaalisen suoran ja mittauskäyrän väliltä kuvan 17 a) mukaisella tavalla. Siinä katkoviiva kuvaa ideaalista suoraa ja yhtenäinen viiva virta-anturin mittauskäyrää. Sovitetun suoran menetelmässä suora on määritetty käyttämällä esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmää. Poikkeama mitataan määritetyn suoran ja mittauskäyrän väliltä. Kuva 17 b) esittää sovitetun suoran menetelmää. Siinä katkoviiva kuvaa määritettyä suoraa ja yhtenäinen viiva virta-anturin mittauskäyrää. Sovitetun suoran menetelmää käyttämällä saatu maksimi lineaarisuusvirhe on aina pienempi kuin päätepistemenetelmällä saatu lineaarisuusvirhe. Yleensä se on noin 50 % päätepistemenetelmän lineaarisuusvirheestä. [17][18][19].



Kuva 17. Integraalisen lineaarisuusvirheen mittausmenetelmät (muokattu lähteestä [19])

Hystereesivirheestä esimerkkeinä ovat kuvan 16 epälineaarisuuskäyrät c) ja d). Hystereesissä hetkellinen mitattu virta i_m ei riipu vain sen hetkisestä todellisesta virrasta i_p vaan myös todellisen virran i_p aiemmasta kehityksestä. Mitattu virta i_m tietyllä todellisella virralla i_p on siten erilainen riippuen kasvatetaanko vai pienennetäänkö todellista virtaa i_p . Kuvan 16 epälineaarisuuskäyrä c) kuvaa hystereesivirhettä, joka ilmenee pienillä virroilla. Kuvan 16 epälineaarisuuskäyrä d) on esimerkki hystereesivirheestä, joka ilmenee koko mittausalueella ja on tyypillinen suljetun magneettipiirin Hall-antureilla johtuen magneettisen sydänmateriaalin magneetoitumisesta. [17]

Differentiaalinen epälineaarisuus on virhetyyppi, jossa todellisen virran i_p pienet muutokset saavat aikaan suhteellisen suuria muutoksia mitattuun virtaan i_m . Virhe ilmenee yleensä nollapistepoikkeamana tai kohinana mitatussa virrassa i_m . [17]

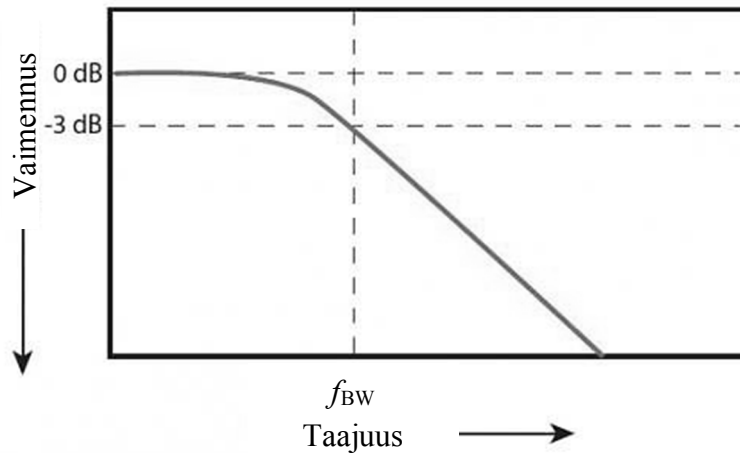
5.2 Dynaamista suorituskkyä kuvaavat ominaisuudet

5.2.1 Kaistanleveys

Kaistanleveys kuvaa virta-anturin kykyä mitata eritaajuisia virtoja, ja sen mittayksikkönä käytetään hertsiä (Hz). Kaistanleveys on yleensä määritelty ala- ja ylärajataajuuden välisenä alueena siten että mittaussignaali vaimenee rajataajuuksilla 3 dB ala- ja ylärajataajuuden väliseen keskitaajuuden f_0 signaalitasoon verrattuna. Keskitaajuus f_0 määritellään ala- ja ylärajataajuuksien geometrisenä keskiarvona

$$f_0 = \sqrt{f_{ala} \cdot f_{ylä}} \quad (36)$$

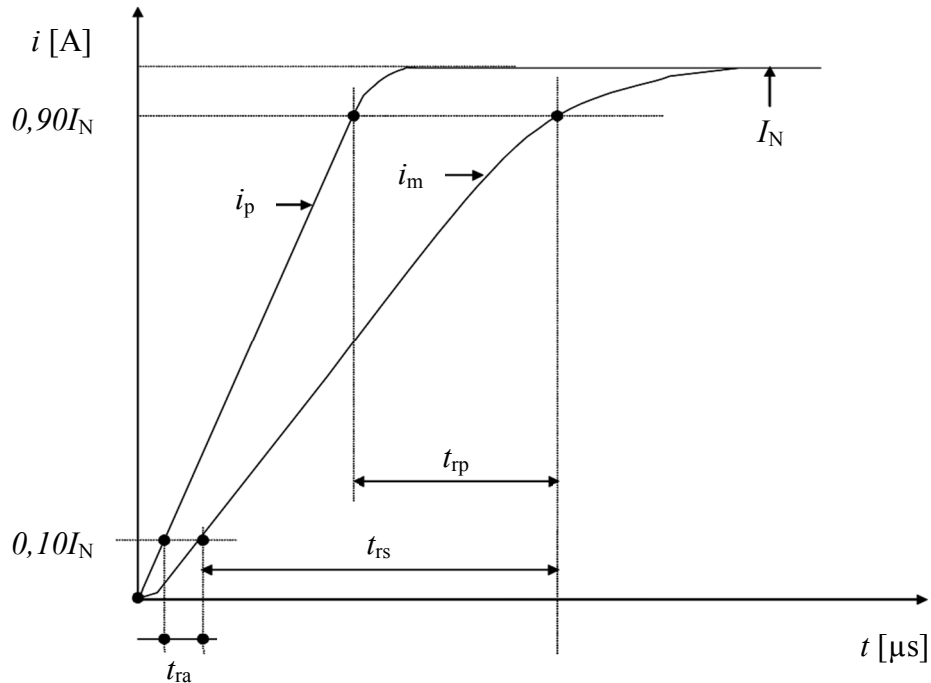
missä f_{ala} on alarajataajuus ja $f_{ylä}$ ylärajataajuus. 3 dB vaimennus vastaa mittaussignaalin pienenemistä noin 29,3 %. Virta-antureilla, jotka mittaavat vaihtovirran lisäksi myös tasavirtaa, kaistanleveys ilmaistaan ainoastaan ylärajataajuutena. Kuva 18 esittää tällaisten anturien taajuusvastetta, joka on alipäästösuodattimen taajuusvasteen kaltainen. Kuvassa x-akselilla on taajuus ja y-akselilla mittaussignaalin vaimennus nollataajuuden signaalitasoon verrattuna. f_{BW} on -3 dB ylärajataajuus.



Kuva 18. Virta-anturin taajuusvaste (muokattu lähteestä [20])

5.2.2 Vasteaika, nousuaika, nousunopeus ja reaktioaika

Kuva 19 esittää virta-anturille syötettävää virtapulssia i_p ja virta-anturin tunnistamaa mittaussignaalia i_m ajan suhteen. Virta-anturille syötetään virtapulssi i_p , joka saavuttaa anturin nimellisvirran I_N tietyn ajan kuluttua.



Kuva 19. Dynaamista suorituskyykyä kuvaavat ominaisuudet (muokattu lähteestä [21])

Virta-anturien ulostulo ei muutu hetkessä niille syötettävän virran muuttuessa, kuten ideaalisessa tilanteessa tapahtuisi, vaan muutos vie aikaa. Tätä aikaa kutsutaan vasteajaksi t_{rp} . Vasteaika t_{rp} on viive siitä hetkestä, kun todellinen virta i_p on saavuttanut 90 % lopullisesta arvostaan, eli $0,90I_N$, hetkeen, kun mitattu virta i_m saavuttaa 90 % lopullisesta arvostaan eli $0,90I_N$. Vasteaikaan vaikuttaa kolme eri tekijää: todellisen virran nousuaika $t_{rs,p}$, nousuaika t_{rs} sekä reaktioaika t_{ra} . [21]

Todellisen virran nousuaika $t_{rs,p}$ kuvaa kuinka nopeasti virta-anturille syötettävä virta muuttuu. Se on aika, joka kuluu todellisen virran i_p muutokseen arvosta $0,10I_N$ arvoon $0,90I_N$. Todellisin virran nousuaika vaikuttaa olennaisesti vasteaikaan. Tämän vuoksi virta-anturille syötettävän virran i_p tulisi käyttäytyä mahdollisimman askelmaisesti amplitudin vastatessa nimellisvirtaa I_N , jotta virta-anturin vasteaika voitaisiin määrittää mahdollisimman tarkasti [21].

Nousuaika t_{rs} kuvaa virta-anturin nopeutta havaita sille syötettävä virta. Se on aika, joka kuluu mitatun virran i_m muutokseen arvosta $0,10I_N$ arvoon $0,90I_N$. Nousuaika t_{rs} voidaan

esittää myös nousunopeuden di_m/dt muodossa. Nousunopeus di_m/dt on mitatun virran keskimääräinen kulmakerroin alueella $0,10I_S \dots 0,90I_S$.

Reaktioaika t_{ra} kuvaa kuinka nopeasti virta-anturi reagoi todellisen virran alkavaan muutokseen. Se on aika, joka kuluu hetkestä, jolloin todellinen virta i_p on saavuttanut arvon $0,10I_N$, hetkeen, jolloin mitattu virta i_m saavuttaa arvon $0,10I_N$.

Vasteajan, nousuajan ja reaktioajan määritelmät on hyvä tarkistaa aina valmistajan datalehdessä, sillä eri valmistajat määrittelevät nämä termit eri tavoin. Esimerkiksi LEM määrittelee vasteajan edellä esitetyllä tavalla, kun Allegro käyttää vasteajan määrittämiseen ajanhetkiä, joilla virtapulssi ja mittaussignaali ovat saavuttaneet 80 % lopullisista arvoistaan.

6. VIRRANMITTAUS HALL-ANTURILLA

Hall-anturien käyttö virranmittaussovelluksissa on yleistä johtuen sen kyvystä mitata sekä staattisia että dynaamisia magneettikenttiä, ja siten tasa- ja vaihtovirtaa, ilman kontaktia mitattavaan virtapiiriin. Hall-anturi koostuu ohuesta johtavasta liuskasta, eli Hall-elementistä, sekä liuskaan kiinnitetyistä neljästä liittimestä. Näistä kaksi on ohjausvirtaa varten ja toiset kaksi jännitteen mittausta varten.

Hall-anturit voidaan jakaa kahteen eri päätyyppiin niiden rakenteen perusteella. Nämä ovat kompensoimaton (open-loop) ja kompensoitu (closed-loop) Hall-anturi. Tämän lisäksi kompensoimaton Hall-anturi voidaan toteuttaa avoimella tai suljetulla magneettipiirillä.

6.1 Hall-elementin materiaali

Hall-elementin materiaalina voidaan käyttää metalleja tai puolijohteita. Alun perin materiaalina käytettiin kultaa, mutta nykyisin erilaiset puolijohteet ovat korvanneet metallit parempien ominaisuuksien vuoksi. Materiaali vaikuttaa olennaisesti Hall-anturin herkkyyteen, sillä herkkyys on suhteessa varaustenkuljettajien liikkuvuuteen, mikä on materiaaliin riippuvainen. Puolijohteilla varaustenkuljettajien suurempi liikkuvuus ja pienempi tiheys saavat aikaan suuremman Hall-jännitteen verrattuna metalleihin, joten puolijohteet sopivat paremmin käytettäväksi Hall-elementin materiaalina.

Puolijohteita käytetään harvoin puhtaassa muodossaan Hall-elementin materiaalina. Usein niitä seostetaan pienellä määrällä vierasta seosainetta, jotta varaustenkuljettajien tiheys saataisiin nostettua halutulle tasolle. Kun puolijohteeseen lisätään atomeja, joilla on enemmän valenssielektroneja kuin puolijohteen atomeilla, saadaan lisää elektroneja varaustenkuljettajiksi. Tällaista puolijohdetta kutsutaan n-tyypin puolijohteeksi. Positiivisia varaustenkuljettajia saadaan lisää seostamalla puolijohteeseen atomeja, joilla on vähemmän valenssielektroneja kuin puolijohteen atomeilla. Positiivisten varaustenkuljettajien lisäämisessä puolijohteeseen seosatomien kohdalle syntyy elektronivajaus, eli positiivinen aukko, joka käyttäytyy varaustenkuljettajana kuten positiivinen varaus. Tällaista puolijohdetta kutsutaan p-tyypin puolijohteeksi. [16]

Seostettujen puolijohteiden käyttöön liittyy muutamia etuja. Ensinnäkin puolijohteiden seostaminen mahdollistaa enemmistövaraustenkuljettajien valinnan elektronien tai

aukkojen väliltä. Elektroneille on ominaista niiden liikkuminen nopeammin verrattuna aukkoihin, joten herkemmissä Hall-antureissa voidaan käyttää n-tyypin puolijohdetta, jossa elektronit ovat enemmistövaraustenkuljettajina. Toinen etu seostettujen puolijohdeiden käyttöön liittyy Hall-anturin stabiiliuteen lämpötilan suhteen. Puhtaissa puolijohdeissa varaustenkuljettajien tiheydellä on suuri lämpötilariippuvuus. Varaustenkuljettajien tiheys, mikä on tuloksena seosaineen lisäyksestä, riippuu pääasiassa seosaineen tiheydestä eikä muutu lämpötilan mukaan. Riittävän suurta seosaineen tiheyttä käyttämällä voidaan saavuttaa suhteellisen stabiili varaustenkuljettajien tiheys lämpötilan suhteen. [16]

Tyypillisimpiä Hall-elementin materiaaleina käytettäviä puolijohteita ovat galliumarsenidi (GaAs), indiumantimonidi (InSb), indiumarsenidi (InAs) ja pii (Si). Piitä käytetään yleisimmin johtuen sen edullisuudesta suurissa tuotantomäärissä. Lisäksi piin käyttö mahdollistaa lähtöasteen elektroniikan integroimisen samalle sirulle. Toinen suosittu materiaali on galliumarsenidi, jolla on suuri Hall-kerroin johtuen sen pienestä varaustenkuljettajien tiheydestä. Sillä on laaja toimintalämpötila-alue, joten se sopii hyvin käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa. Indiumantimonidilla ja indiumarsenidilla puolestaan varaustenkuljettajien liikkuvuus on suuri, mikä parantaa mittausherkkyyttä. [17] Kuparin sekä yleisimpien Hall-elementeissä käytettävien puolijohdeiden varaustenkuljettajien liikkuvuus ja tiheys on esitetty taulukossa 1.

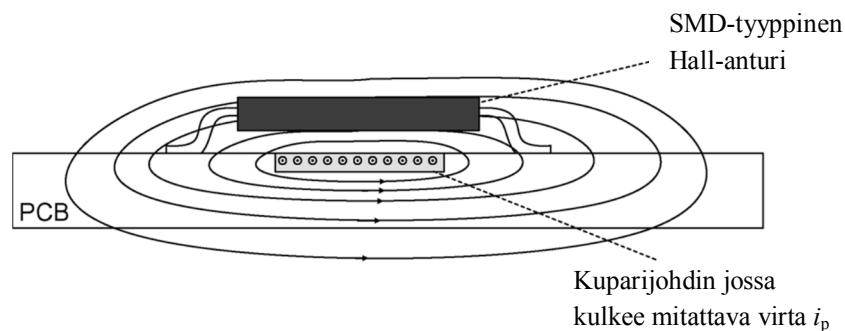
Taulukko 1. Varaustenkuljettajien ominaisuudet kuparissa sekä yleisimmissä Hall-elementtien puolijohdeissa 300 K lämpötilassa [22][23]

Materiaali	Varaustenkuljettajien liikkuvuus μ [cm^2/Vs]	Varaustenkuljettajien tiheys n [$1/\text{cm}^3$]
Cu	35	$8,4 \cdot 10^{22}$
Si	1450	$1,2 \cdot 10^{10}$
GaAs	8500	$2 \cdot 10^6$
InAs	23000	$1,3 \cdot 10^{15}$
InSb	80000	$\approx 10^{16}$

6.2 Kompensoimaton Hall-anturi

6.2.1 Avoimen magneettipiirin Hall-anturi

Yksinkertaisin tapa mitata virtaa epäsuorasti magneettikentän avulla on käyttää kompensoimatonta avoimen magneettipiirin Hall-anturia. Kuvassa 20 on esitetty virran mittaaminen piirilevyllä kulkevasta kuparijohtimesta pintaliitostyyppisellä Hall-anturilla, jossa samalle sirulle on integroituna Hall-elementin lisäksi myös lähtöasteen elektroniikka.



Kuva 20. Yksinkertaisin tapa mitata virtaa kompensoimattomalla avoimen magneettipiirin Hall-anturilla. Hall-anturi mittaa suoraan johdinta ympäröivää magneettikenttää (muokattu lähteestä [24])

Kuvassa 20 Hall-anturi on sijoitettu piirikortille mahdollisimman lähelle kuparijohdinta, jossa kulkevaa virtaa i_p halutaan mitata. Kuparijohtimessa kulkeva virta muodostaa luvussa 3.1 esitetyn Ampèren lain mukaisesti johtimen ympärille magneettikentän, joka läpäisee Hall-anturin. Hall-anturin ulostulojännite, joka on suoraan verrannollinen anturin läpäisevään magneettikenttään ja siten johtimessa kulkevaan virtaan, ilmaisee johtimessa kulkevan virran suuruuden.

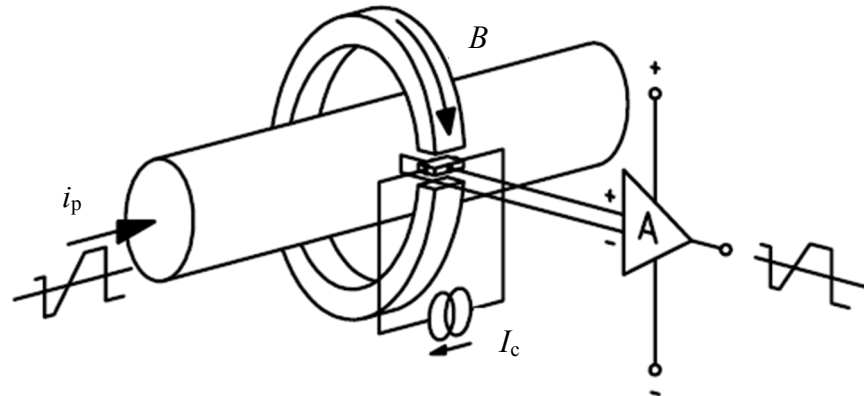
Kompensoimaton avoimen magneettipiirin Hall-anturi mittaa virtaa epäsuorasti magneettikentän avulla. Tämän vuoksi se ei vaikuta mitattavaan piiriin millään tavalla eikä lisää siihen häviöitä. Lisäksi kompensoimattoman avoimen magneettipiirin Hall-anturilla on etuina yksinkertaisen rakenteen vuoksi pieni koko sekä edullinen hinta. [24] Magneettisesta materiaalista valmistetun sydämen puuttuminen on suurin syy pieneen kokoon, sillä Hall-anturien ja muiden magneettikentän avulla suoritettavaan virranmittaukseen perustuvien menetelmien, jotka sisältävät suljetun magneettipiirin, yksi rakenteellisesti suuri osa on magneettinen sydän. Kompensoimattoman avoimen magneettipiirin Hall-anturit sopivat erityisesti piirikorteilla käytettäväksi, joissa komponenttien pieni koko on niiden sijoittelun kannalta eduksi.

Magneettisesta materiaalista valmistetun sydämen puuttuminen tällaisesta ratkaisusta tuo virranmittaukseen haasteita. Mitattavan virran ja Hall-anturin havaitseman magneettikentän suhde ei ole vakio vaan riippuu muun muassa anturin sijainnista. Tämän vuoksi mitattavan virran ja Hall-anturin havaitseman magneettikentän suhdekerroin täytyy määrittää erikseen tapauskohtaisesti, jotta mittaustulokset ovat luotettavia. Hall-anturi tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle mitattavaa johdinta, jotta anturin lävistävän magneettikentän voimakkuus ei heikkene liikaa ja heikennä mittaustarkkuutta. Toisaalta mikäli Hall-anturi sijaitsee liian lähellä johdinta, virranahdo voi heikentää mittaustarkkuutta. Virranahdossa on kyse virran epätasaisesta jakautumisesta johtimen poikkipinnalla. Vaihtovirta ei jakaudu tasaisesti johtimen poikkipinnalle, kuten tasavirta, vaan virta kulkee pääasiassa johtimen pinnalla. Johtimen pinnalle muodostuu suurempi virrantiheys kuin johtimen sisälle. Tällä on vaikutusta johtimen ympärille muodostuvaan magneettikenttään erityisesti johtimen lähellä ja siten myös Hall-anturin mittaustulokseen. Suurin ongelma mittaustarkkuuteen aiheutuu kuitenkin ulkoisista magneettisista hajakentistä. Magneetit ja kelat voivat magneettikentillään aiheuttaa Hall-anturin mittaustulokseen useiden prosenttien virheen, vaikka näiden välillä olisi matkaa kymmeniä senttimetrejä. Vaikka magneettien ja kelojen vaikutus olisi vähäinen, maan magneettikenttä vaikuttaa mittaustulokseen, kuten luku 3.1 osoittaa. Suojautuminen tällaisia hajakenttiä vastaan on hankalaa. Sekä staattisia että dynaamisia hajakenttiä vastaan vaadittaisiin suojautumista materiaaleilla, joilla on suuri johtavuus ja permeabiliteetti. Nämä magneettiset suojat kuitenkin muuttaisivat magneettikenttää myös Hall-anturin kohdalla sekä aiheuttaisivat häviöitä pyörrevirroista johtuen. Lineaarisen ja toistettavissa olevan suhteen saaminen johtimessa kulkevan virran ja johtimen ympärille muodostuvan magneettikentän välille laajalla taajuusalueella tulisi tämän vuoksi erittäin hankalaksi. [24]

6.2.2 Suljetun magneettipiirin Hall-anturi

Edellä esitetystä kompensoimattomasta avoimen magneettipiirin Hall-anturista hieman monimutkaisempi toteutustapa saadaan aikaiseksi käyttämällä magneettisesta materiaalista, kuten ferriitistä, valmistettua sydäntä. Tämä toteutustapa on nimeltään kompensoimaton suljetun magneettipiirin Hall-anturi. Kuvassa 21 on esitetty tällaisen Hall-anturin toimintaperiaate. Kuvassa on virtajohdin, jossa kulkevaa virtaa i_p Hall-anturilla mitataan. Johtimen ympärille on asetettu magneettisesta materiaalista valmistettu renkaan muotoinen sydän. Se tehtävänä on keskittää virran i_p ympärilleen muodostama magneettikenttä sydämen ilmaräliin asetetulle Hall-elementille. Hall-elementtiin on kytketty virtalähde, joka syöttää elementille tarvittavan ohjausvirran I_c . Johtimessa kulkeva virta i_p saa aikaan magneettivuon tiheyden B sydämen ilmaräliin, joka hystereesikäyrän lineaarisella alueella on suoraan verrannollinen virtaan i_p .

Magneettivuon tiheyden B ja ohjausvirran I_c vaikutuksesta Hall-elementin yli muodostuu Hall-jännitte u_H , joka vahvistetaan tarvittavalle tasolle. [21]

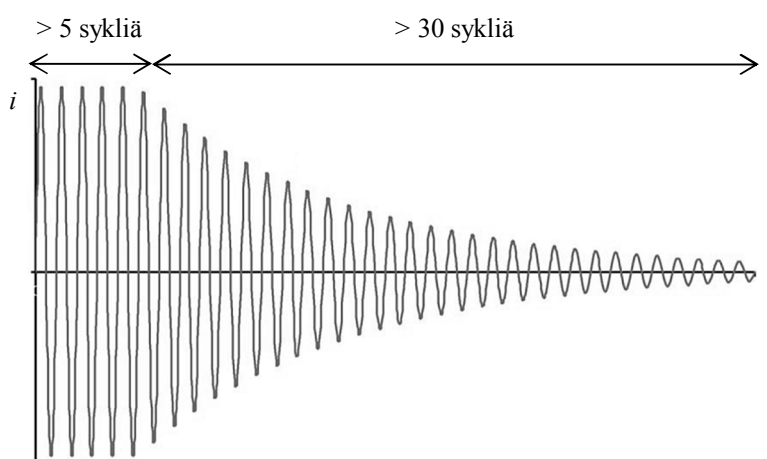


Kuva 21. Virranmittaus kompensoimattomalla suljetun magneettipiirin Hall-anturilla [21]

Magneettisen sydämen lisääminen Hall-anturiin tuo useita etuja luvussa 6.2.1 esitettyyn kompensoimattomaan avoimen magneettipiirin Hall-anturiin verrattuna. Johtimen ympäröimä sydän vähentää merkittävästi ympäröivien hajakenttien vaikutusta sekä kasvattaa anturin herkkyyttä magneettisen sydänmateriaalin suuren suhteellisen permeabiliteetin vuoksi. Näiden lisäksi sydämen sisältävän Hall-anturin mittaustulos on riippumaton Hall-elementin etäisyydestä mitattavaan johtimeen, koska sydän keskittää johtimen ympärilleen muodostaman magneettikentän suoraan Hall-elementille. Tämän vuoksi myöskään virranahdolla ei ole vaikutusta mittaustulokseen. [24]

Haittana kompensoimattoman suljetun magneettipiirin Hall-anturissa on anturin koko verrattuna kompensoimattomaan avoimen magneettipiirin Hall-anturiin. Magneettisesta materiaalista valmistettu sydän lisää anturin kokoa, jonka vuoksi anturin sijoittaminen optimaaliseen kohtaan mitattavaa kytkentää voi olla haastavaa. Lisäksi kompensoimattoman suljetun magneettipiirin Hall-anturin suorituskyky ei riipu ainoastaan Hall-elementin ominaisuuksista vaan myös magneettisesta sydänmateriaalista. Usein sydänmateriaali rajoittaa anturin suorituskykyä enemmän kuin anturin muut osat, kuten Hall-elementti. Tämä johtuu sydänmateriaalissa tapahtuvista häviöistä, jotka ovat yhdistelmä hystereesiä ja pyörrevirtoja. Muuttuva magneettivuon tiheys, joka indusoi jännitteitä sydänmateriaalin sisällä, saa aikaan pyörrevirtoja. Pyörrevirrat puolestaan aiheuttavat vastushäviöitä. Sydänmateriaalin häviöt saavat aikaan sydänmateriaalin kuumenemista, jonka vuoksi kaistanleveyttä joudutaan usein rajoittamaan suuritaajuuksien virtojen osalta. Kompensoitamattoman suljetun magneettipiirin Hall-anturien osalta täytyy huomioida myös sydänmateriaalin satureutuminen. Tämä johtuu yleensä ylivirtatilanteista ja aiheuttaa mittaustulokseen pysyvän nollapistepoikkeaman, joka on yleensä yli yhden prosentin luokkaa.

Ylivirtatilanne voi syntyä esimerkiksi vikatilanteessa, jossa mitattavan virran magneettikenttä magnetoit sydänmateriaalia hyvin voimakkaasti. [21] Pysyvä sydänmateriaalin magnetoituminen on mahdollista poistaa demagnetoimalla sydänmateriaalia kuvan 22 mukaisella degauss-syklillä. Kuva esittää demagnetointivirran suuruutta ajan funktiona. Sydänmateriaalin demagnetointi degauss-syklillä tehdään koko sydänmateriaalin hystereesikäyrän alueella matalataajuisella vaihtovirralla. Alussa, vähintään viiden syklin ajan, virran amplitudi pidetään maksimissaan, jonka jälkeen vähintään 30 syklin aikana virta pienennetään nolnaan. [24]



Kuva 22. Degauss-sykli (muokattu lähteestä [24])

6.2.3 Avoimen ja suljetun magneettipiirin Hall-anturien yhteiset ominaisuudet

Kompensoimattoman Hall-anturin mittaustarkkuus riippuu anturin sähköisten ominaisuuksien lisäksi ympäristön ominaisuuksista. Tyypillisesti mittaustarkkuus on muutamia prosentteja. Siihen vaikuttavia tekijöitä ovat nollapistepoikkeama, vahvistusvirhe, epälineaarisuus sekä kaistanleveys. Nollapistepoikkeama riippuu Hall-elementin sekä lähtöasteen elektronikan ominaisuuksista. Suljetun magneettipiirin Hall-anturissa myös magneettisen sydänmateriaalin saturoituminen, ja sen seurauksena sydänmateriaalissa ilmenevä remanenssi, eli jäännösmagnetismi, saa aikaan nollapistepoikkeamaa. Vahvistusvirheen suuruuteen vaikuttaa Hall-elementin virtalähde, Hall-elementti sekä sydämen ilmapäli. Epälineaarisuus on riippuvainen magneettisesta sydänmateriaalista, Hall-elementistä sekä lähtöasteen elektronikasta. Kaistanleveyteen vaikuttavat tekijät ovat lähtöasteen elektronikka sekä sydänmateriaalin kuumeneminen siinä olevista häviöistä johtuen. Avoimen magneettipiirin Hall-anturissa mittaustarkkuuteen vaikuttaa lisäksi anturin sijainti suhteessa virtajohtimeen. Muutos anturin ja johtimen välisessä kohtisuorassa

etäisyydessä tai sivuttaissuunnassa muuttaa mittaustulosta ja voi heikentää mittaustarkkuutta. Lisäksi toimintalämpötilan muutokset saavat aikaan nollapistepoikkeaman ja vahvistuksen ajautumista. [21]

Kompensoimattomalla Hall-anturilla voidaan mitata tasavirtaa, vaihtovirtaa sekä monimutkaisempia virran aaltomuotoja, toisin kuin esimerkiksi virtamuuntajalla tai Rogowski-kelalla, joilla ainoastaan vaihtovirranmittaus on mahdollista [24]. Kompensoimattoman Hall-anturin etuna on virran mittaaminen epäsuorasti magneettikentän avulla. Tämän ansiosta mitattavan virran ja mittauselektroniikan välille muodostuu automaattisesti galvaaninen erotus, jolloin erityistä galvaanista erotinta ei tarvita.

Rakenteesta johtuen kompensoimattomalla Hall-anturilla on etuina edullinen hinta, pieni koko, kevyt rakenne sekä pieni ja mitattavasta virrasta riippumaton tehonkulutus. Vaikka magneettisydän kasvattaa kompensoimattoman suljetun magneettiipiirin Hall-anturin kokoa ja painoa verrattuna kompensoimattomaan avoimen magneettiipiirin Hall-anturiin, ovat koko ja paino pieniä verrattuna muihin vastaaviin virranmittausmenetelmiin. Nämä edut tulevat esille erityisesti suurten virtojen mittaukseen tarkoitetuilla antureilla.

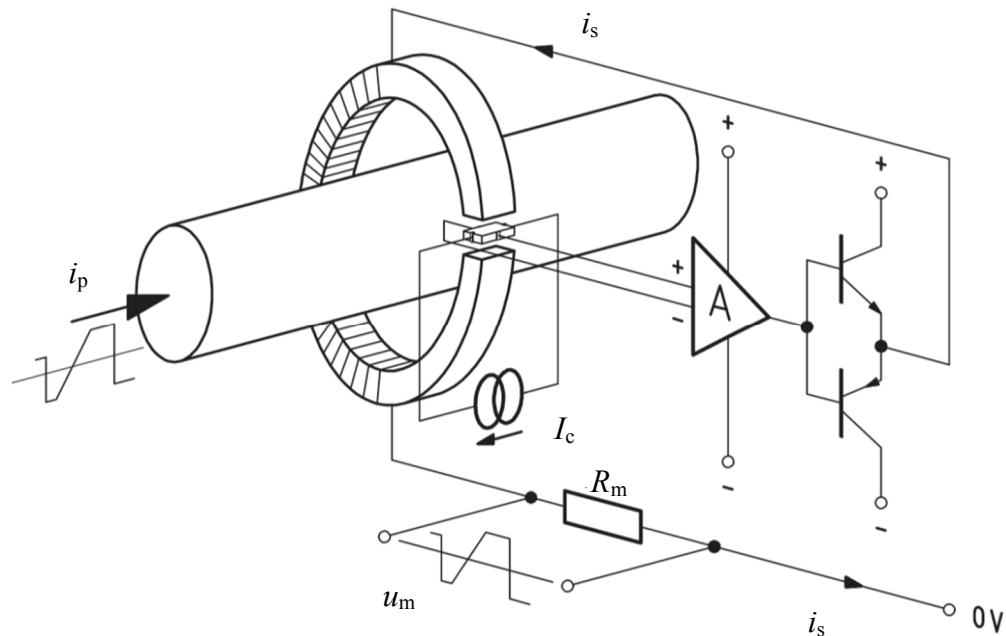
Kompensoimattoman Hall-anturin virranmittausalue riippuu muun muassa magneettisen sydänmateriaalin hystereesisilmukan lineaarisesta alueesta sekä lähtöasteen elektroniikasta. Tyypillisesti hetkellisesti mitattava maksimivirta on noin 2...3 kertaa ilmoitettua nimellisvirtaa suurempi. Kompensoimaton Hall-anturi kestää hyvin ylikuormitusta, sillä ylikuormituksen seurauksena anturi ei rikkoudu vaan ainoastaan saturoituu. Kompensoimaton avoimen magneettiipiirin Hall-anturi toimii oikein ylikuormitustilanteen palautuessa normaaliksi, ja kompensoimaton suljetun magneettiipiirin Hall-anturi voidaan demagnetoida degauss-syklillä. [21]

Rajoitteina kompensoimattomalla Hall-anturilla on hieman huonompi kaistanleveys ja vasteaika verrattuna kompensoituun Hall-anturiin. Myös magneettisesta sydänmateriaalista ja Hall-elementistä johtuva vahvistuksen lämpötila-ajautuminen on suurempaa. [21]

6.3 Kompensoitu Hall-anturi

Kompensoidulla Hall-anturilla on luvussa 6.2 esitettyä kompensoimatonta Hall-anturia monimutkaisempi rakenne, ja se toteutetaan aina suljetulla magneettiipiirillä. Kompensoidussa Hall-anturissa Hall-jännitettä käytetään kompensointivirran i_s aikaansaamiseksi toisin kuin kompensoimattomassa Hall-anturissa, jossa sitä käytetään suoraan anturin ulostulona. Kuvassa 23 on esitetty kompensoidun Hall-anturin rakenne.

Samoin kuin kompensoimattomassa suljetun magneettipiirin Hall-anturissa, tässäkin tapauksessa magneettisesta materiaalista valmistettu sydän on asetettu virtajohtimen ympäri, jossa kulkevaa virtaa i_p halutaan mitata. Samoin Hall-elementti on sijoitettu sydämen ilmapäliin. Toisin kuin kompensoimattomassa Hall-anturissa, Hall-elementin ulostulo on kytketty vahvistimen, sydämen ympärille käämityn kelan sekä mittaussvstuksen R_m kautta nollapotentiaaliin.



Kuva 23. Virranmittaus kompensoidulla Hall-anturilla
(muokattu lähteestä [21])

Virtajohtin muodostaa ympärilleen magneettikentän, joka on suhteessa johtimessa kulkevaan virtaan i_p . Tämä magneettikenttä keskitetään virtajohtinta ympäröivän magneettisen sydämen avulla sydämen ilmapäliissä sijaitsevalle Hall-elementille. Hall-elementin läpäisevän magneettivuon ja ohjausvirran I_c vaikutuksesta muodostuu Hall-jännite, joka vahvistetaan tarvittavalle tasolle. Vahvistettu Hall-jännite saa aikaan kompensointivirran i_s , joka kulkee kelan kautta. Tämä kompensointivirta i_s muodostaa sydämeen vastakkaissuuntaisen magneettikentän mitattavan virran i_p muodostamaan magneettikenttään verrattuna. Tästä seuraa että sydämen, ja siten myös sydämen ilmapäliissä sijaitsevan Hall-elementin, kokonaismagneettivuo on nolla.

Kun Hall-elementin läpäisevä magneettivuo on täysin kompensoitu eli nolla, kompensointivirta i_s on verrannollinen mittavaan virtaan i_p ja johdinten kierrosten lukumäärään siten että

$$N_p i_p = N_s i_s \quad (37)$$

eli

$$i_s = \frac{i_p N_p}{N_s} \quad (38)$$

missä N_p on virtajohtimen, jossa kulkee mitattava virta i_p , kierrosten lukumäärä sydämen ympäri ja N_s on kelan, jossa kulkee kompensointivirta i_s , kierrosten lukumäärä sydämen ympäri. Yleensä virtajohtimen kierrosten lukumäärä N_p on yksi, jolloin kompensointivirta i_s on verrannollinen mitattavaan virtaan i_p sekä kelan kierrosten lukumäärään N_s siten että

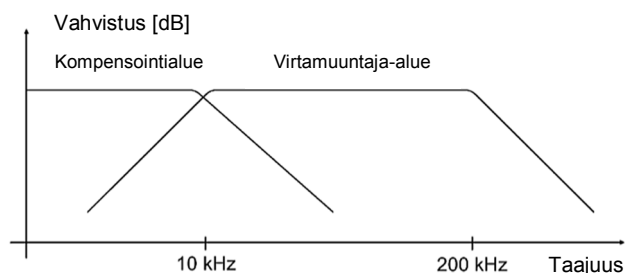
$$i_s = \frac{i_p}{N_s} \quad (39)$$

Kelan kanssa sarjassa olevan mittausvastuksen R_m yli muodostuu kompensointivirran i_s aikaansaama ulostulojännite u_m , jota voidaan skaalata mittausvastuksen R_m vastusarvolla. [21]

Kompensoidulla, samoin kuin kompensoimattomalla Hall-anturilla, voidaan mitata tasa- ja vaihtovirtaa sekä monimutkaisempia virran aaltomuotoja galvaanisesti erotettuna mitattavasta johtimesta. Kompensoidun Hall-anturin etuina ovat erittäin hyvä tarkkuus ja lineaarisuus, pieni vahvistuksen ajautuminen, laaja kaistanleveys sekä pieni vasteaika.

Magneettivuon kompensointi poistaa lämpötilan muutoksesta johtuvan vahvistuksen ajautumisen. Hall-anturin lähdössä voi kuitenkin olla nollapistepoikkeamaa johtuen Hall-jännitteen vahvistuksesta sekä magneettisen sydänmateriaalin jäännösmagnetismista. Tämä voi aiheuttaa lämpötilan muutoksesta johtuvaa nollapistepoikkeaman ajautumista. [21]

Suuremmilla taajuuksilla kompensointivirtajohtimen käämitys sydämen ympärillä toimii virtamuuntajana. Kuvassa 24 on esitetty kompensoidun Hall-anturin ulostulon kaksi aluetta. Matalilla taajuuksilla anturi hyödyntää Hall-elementtiä sekä kompensointielektroniikkaa, ja suuremmilla taajuuksilla käämitys toimii virtamuuntajana. Tämä kasvattaa huomattavasti kaistanleveyttä ja pienentää anturin vasteaikaa. Tyypillisesti kompensoidun Hall-anturin kaistanleveys yltää 200 kHz:iin saakka, mutta joidenkin valmistajien antureilla on mahdollista saavuttaa jopa 1 MHz kaistanleveys. Rajoitteita tähän tuo tasaisen taajuusvasteen aikaansaaminen erityisesti kahden taajuusvastekäyrän risteyskohdassa, jotta anturin tarkkuus olisi mahdollisimman hyvä. Toinen kaistanleveyttä rajoittava tekijä aiheutuu Hall-anturin magneettisista epäideaalisuuksista, sillä magneettisessa sydänmateriaalissa ilmenee magneettisia häviöitä suurilla taajuuksilla johtuen muun muassa hajavuosta. [21]



Kuva 24. *Kompensoidun Hall-anturin käyttö virtamuuntajana (muokattu lähteestä [24])*

Kompensoidun Hall-anturin haittana kompensoimattomaan Hall-anturiin verrattuna on suurempi käyttöjännite ja virrankulutus. Suurempi virrankulutus johtuu käyttöjännitteestä, jonka tehtävänä on ohjata kompensointi- ja biasointivirtaa. Lisäksi kompensoidulla Hall-anturilla on monimutkaisempi rakenne ja suurempi koko kompensointielektroniikasta ja -käämistä johtuen. Kokoero kompensoimattoman ja kompensoidun Hall-anturin välillä on huomattava, kun on kyse suurempaa virtaa mittaavista Hall-antureista. Kompensoidun Hall-anturin monimutkaisempi rakenne tekee anturista myös kalliimman. [21]

6.4 Yhteenveto Hall-antureista

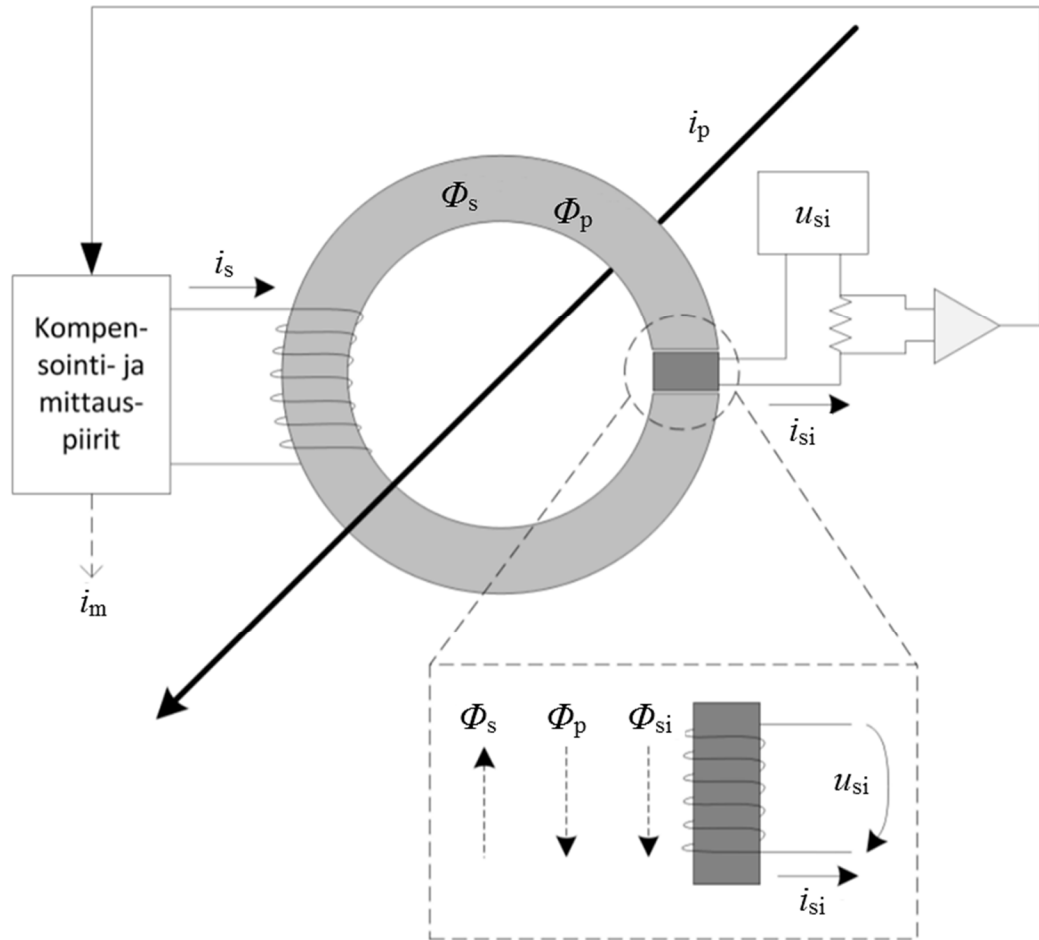
Sekä kompensoimaton että kompensoitu Hall-anturi tarjoaa monia etuja virranmittaukseen. Se kumpi näistä kahdesta soveltuu virranmittaukseen paremmin, riippuu virranmittauksen kohteesta sekä mittauksen tarkkuusvaatimuksesta. Kompensoidun Hall-anturi on edullisempi verrattuna kompensoituun Hall-anturiin, kun on kyse suurten virtojen antureista. Lisäksi sen koko ja paino ovat pienemmät. Kompensoidun Hall-anturi soveltuu myös sovelluksiin, joissa tehonkulutus halutaan pitää pienenä ja riippumattomana mitatun virran suuruudesta. Kompensoidun Hall-anturi on toisaalta sopivampi teollisuuden sovelluksiin. Sen tarkkuus on parempi kuin kompensoimattomalla Hall-anturilla, ja hyvän häiriösietoisuuden vuoksi se soveltuu olosuhteisiin, joissa on paljon sähkömagneettisia häiriöitä. [25] Sivuilla 50 ja 51 olevissa taulukoissa 2 ja 3 on vertailtu Hall-anturien tyypillisiä ominaisuuksia muihin virranmittausmenetelmiin.

7. VIRRANMITTAUS MUILLA MENETELMILLÄ

7.1 Fluxgate

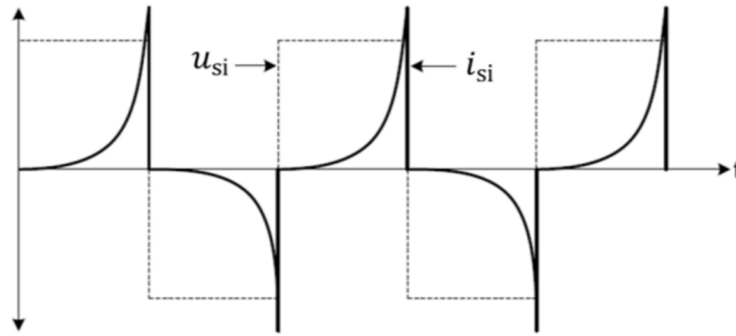
7.1.1 Toimintaperiaate

Fluxgate-anturin toiminta perustuu virran mittaamiseen epäsuorasti virtajohtimen ympärillä olevaa magneettikenttää hyödyntäen, kuten Hall-anturien tapauksessa. Kuvassa 25 esitetty Fluxgate-anturin perusrakenne vastaa luvussa 6.3 esitetyn kompensoidun Hall-anturin rakennetta. Magneettisesta materiaalista valmistettu ympyrän muotoinen sydän ympäröi johdinta, jossa kulkevaa virtaa i_p halutaan mitata. Ero kompensoidun Hall-anturin ja Fluxgate-anturin välillä on menetelmä, jolla sydämen ilmavälin magneettivuo havaitaan. Fluxgate-anturin toiminta perustuu magneettisydämen kyllästystilan havaitsemiseen. Sen vuoksi magneettisydämen ilmavälissä sijaitsevan kompensoidun Hall-anturin Hall-elementin on korvannut Fluxgate-elementti. Fluxgate-elementti on eräänlainen kyllästyvä kuristin, jonka induktanssi muuttuu magneettivuon tiheyden funktiona. Se koostuu ohuesta magneettisydäimestä sekä sydämen ympäri kierretystä herätekäämistä. Sen induktanssi on suuri magneettivuon ollessa lähellä nollaa ja pieni magneettisydämen kyllästyessä. Fluxgate-elementin magneettisydän on helposti kyllästyvää ja suuren magneettisen permeabiliteetin omaavaa ainetta. Kompensoidun Fluxgate-anturin tapauksessa magneettisydämen ympärille on lisäksi kierretty kompensointikäämi, joka on yhdistetty kompensointi- ja mittauspiireihin, joiden tehtävänä on kompensoida ulkoinen magneettikenttä. [21]



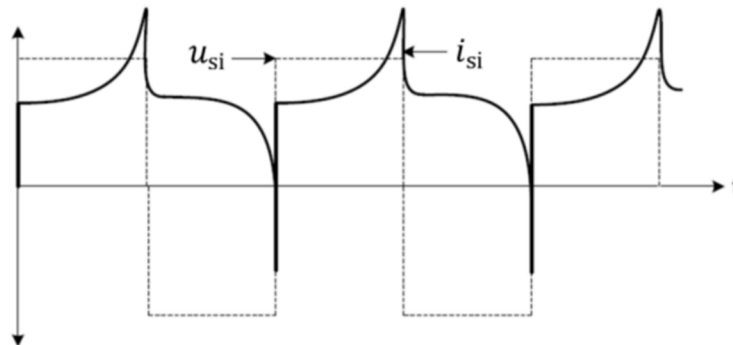
Kuva 25. Virranmittaus Fluxgate-anturilla (muokattu lähteestä [4])

Kuvassa 25 johtimessa kulkeva virta i_p muodostaa ympärilleen magneettivuon Φ_p , joka johtimen ympärillä olevan magneettisydämen avulla keskitetään sydämen ilmapäälissä sijaitsevalle Fluxgate-elementille. Heräteköömiin syötetään vaihtojännite u_{si} taajuudella f (esimerkiksi 10 kHz), mikä saa aikaan vaihtovirran i_{si} ja muodostaa Fluxgate-elementin magneettisydämeen magneettivuon Φ_{si} . Vaihtovirta i_{si} saa magneettisydämen materiaalin värähtelemään kyllästyspisteiden välillä. Kuva 26 esittää tilannetta, jossa Fluxgate-elementin heräteköömiin syötetään kantiaallon muotoinen jännite u_{si} , kun mitattava virta i_p on nolla, eli ilmapäälän magneettivuo $\Phi_p + \Phi_s = 0$. Tämä jännite u_{si} saa virran i_{si} käyttäytymään kuvan 26 mukaisella tavalla. Virta i_{si} kasvaa eksponentiaalisesti, kunnes lyhyen ajan kuluttua Fluxgate-elementin magneettisydän saturoituu, jolloin sen induktanssi pienenee siten että ainoastaan heräteköömiin resistanssi rajoittaa virtaa i_{si} . Jännitteen u_{si} polariteetin vaihtuessa induktanssi alkaa kasvaa, jolloin virta i_{si} pienenee, kunnes virran suunta vaihtuu ja magneettisydän saturoituu uudelleen. Kuvasta 26 voidaan havaita virran i_{si} keskiarvon olevan nolla. [4][21]



Kuva 26. Fluxgate-elementin virtavaste i_{si} ja jänniteheräte u_{si} , kun $i_p = 0$ [4]

Kuvassa 27 on esitetty tilanne, jossa mitattava virta i_p eroaa nolasta, jolloin ilmavälin magneettivuon $\Phi_p + \Phi_s \neq 0$. Fluxgate-elementin magneettisydämessä on nolasta poikkeava magneettivuon, vaikka herätekäämissä ei kulje virtaa i_{si} . Virta i_{si} saavuttaa lähes heti nolasta poikkeavan tason ja pysyy suhteellisen stabiilina, kunnes magneettisydän saturoituu ja induktanssi pienenee. Kuvasta 27 voidaan havaita virran i_{si} keskiarvon poikkeavan nolasta. Virran i_{si} arvo ja etumerkki ovat verrannollisia ulkoiseen magneettivuohon Φ_p ja siten virtaan i_p sekä virran suuntaan. [4][21]



Kuva 27. Fluxgate-elementin virtavaste i_{si} ja jänniteheräte u_{si} , kun $i_p \neq 0$ [4]

Virran i_{si} vaihtelu havaitaan kompensointielektronikalla, joka ohjaa kompensointikäämin virtaa i_s . Kompensointikäämin virta i_s muodostaa magneettisydämeen magneettivuon Φ_s ja kompensoi ulkoisen magneettivuon Φ_p nolaksi. Kun tunnetaan kompensointikäämin virta i_s sekä kompensointikäämin kierrosten lukumäärä N_s , saadaan mittavaksi virraksi

$$i_p = N_s i_s \quad (40)$$

Kompensoimattomassa Fluxgate-anturissa sekä kompensointielektronikka että kompensointikäämi puuttuu, jolloin herätekäämin virta i_{si} on anturin ulostulo. [21]

Fluxgate-anturi voidaan toteuttaa kompensoimattoman tai kompensoidun rakenteen lisäksi monilla muilla tavoilla. Edellä esitetty Fluxgate-anturi on rakenteeltaan perustyyppinen Fluxgate-anturi. Muissa Fluxgate-anturityypeissä suorituskkyä pyritään parantamaan muun muassa lisäämällä magneettisydämiä, tekemällä Fluxgate-elementistä ilmapäälitön kokoympyrän muotoinen rengas tai käyttämällä kahta Fluxgate-elementtiä. Usein tavoitteena on kaistanleveyden kasvattaminen. [21]

7.1.2 Edut ja haitat

Suurimpina etuina Fluxgate-antureilla, verrattuna muihin magneettikentän mittaamiseen perustuviin virta-antureihin, ovat pieni nollapistepoikkeama ja nollapistepoikkeaman ajautuminen. Pieni nollapistepoikkeama ja nollapistepoikkeaman ajautuminen ovat seurausta Fluxgate-anturin ominaisuudesta, jossa ohjausjännitteen polariteetin vaihtelu saa aikaan Fluxgate-elementin magneettisydämen magneettivuon tiheyden kiertämään hystereesisilmukkaa. Tämä poistaa Fluxgate-elementin magneettisydämen magnetoitumisesta aiheutuvan nollapistepoikkeaman mutta ei kuitenkaan vaikuta kompensointielektroniikasta aiheutuvaan nollapistepoikkeamaan tai sen ajautumaan. Pieni nollapistepoikkeaman ajautuminen saa aikaan myös suuren lämpötilastabiiliuden, joka mahdollistaa anturien toiminnan laajalla lämpötila-alueella. [21]

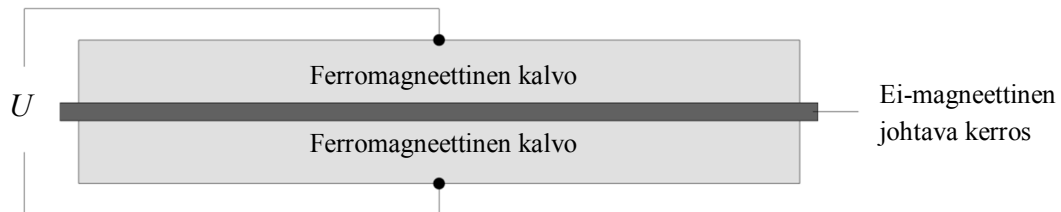
Pienestä nollapistepoikkeamasta johtuen Fluxgate-anturien tarkkuus on erinomainen. Hall-antureihin verrattuna pienten virtojen mittaamisessa tämä etu on huomattavampaa, koska silloin nollapistepoikkeaman suhteellinen vaikutus on merkittävämpi. Lisäksi Fluxgate-anturien suuri resoluutio, eli erottelukyky, mahdollistaa hyvin pienten magneettivuon tiheyksien mittaamisen. Ilman suuntatietoa pienimmät mitattavat magneettivuon tiheydet ovat muutaman mikrogauusin suuruisia. Vektorimittauksissa tarkkuus ei yllä samaan vaan jää noin milligauusin tasolle. Fluxgate-antureilla on myös hyvä herkkyys, mikä mahdollistaa virran mittaamisen pienellä käämin kierrosmäärällä sekä yksinkertaisella ja edullisemmalla lähtöasteen elektroniikalla verrattuna pienemmän herkkyyden antureihin. [21][27][28]

Rajoitteina erityisesti yksinkertaisen rakenteen omaavilla Fluxgate-antureilla on pieni virranmittausalue. Mitattavan magneettivuon yläraja jää noin 100 G suuruusluokkaan. Erityisesti perinteisten Fluxgate-anturien rakenne on usein melko kookas, painava sekä monimutkainen. Suorituskvyn kasvattaminen lisää kokoa, monimutkaisuutta ja hintaa entisestään johtuen muun muassa lisämagneettisydänten käytöstä, joilla kaistanleveyttä pyritään parantamaan. Fluxgate-anturit eivät myöskään ole niin kestäviä kuin pienemmät anturit, ja samoin kuin kompensoidulla Hall-anturilla myös Fluxgate-anturilla on melko suuri tehonkulutus. [27][28]

7.2 GMR

7.2.1 Toimintaperiaate

GMR (Giant Magnetoresistance) -anturi on magnetovastus, jonka resistanssi muuttuu huomattavasti ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Sen toimintaan liittyy nimensä mukaisesti suuri magnetoresistanssi -ilmiö. Tämä ilmiö perustuu ohuiden ferromagneettisten ja ei-magneettisten metallikerrosten vuorotteluun sekä elektronien spin-ominaisuuteen. Kuvassa 28 on esitetty poikkileikkaus yleisimmästä GMR-anturin rakenteesta. Tätä rakennetta kutsutaan nimellä unpinned sandwich GMR, ja se koostuu kahdesta ferromagneettisesta kalvosta (tyypillisesti nikkeli-rauta (NiFe) tai koboltti-rauta (CoFe)) sekä niitä erottavasta ohuesta ei-magneettisesta johtavasta kerroksesta (kupari (Cu), kulta (Au) tai rutenium (Ru)). [27]

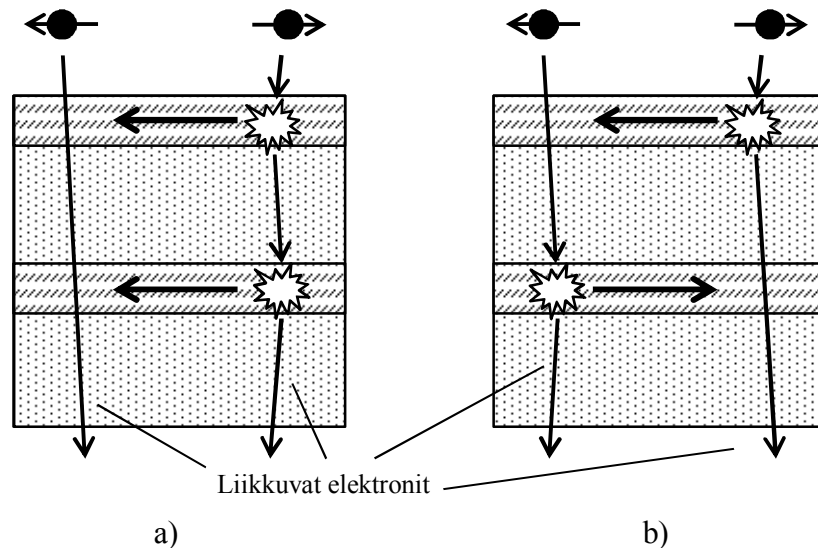


Kuva 28. GMR-anturi (muokattu lähteestä [29])

GMR-anturin resistanssi riippuu ferromagneettisten kerrosten magneettisten momenttien keskinäisistä suunnista. Kalvoilla, joilla momentit ovat yhdensuuntaiset, on pienempi resistanssi kuin kalvoilla, joilla momentit ovat erisuuntaisia. Syynä tähän on elektronien sironta kerrosten rajapinnoissa. Sironta on voimakasta elektroneille, joiden spin on vastakkaissuuntainen kerroksen momentin kanssa, ja heikkoa elektroneille, joiden spin on yhdensuuntainen kerroksen momentin kanssa. Ferromagneettisten kerrosten magneettisten momenttien keskinäisiin suuntiin vaikuttaa ulkoinen magneettikenttä. Ulkoisen magneettikentän avulla kerrosten magneettiset momentit pyrkivät kääntymään yhdensuuntaisiksi. [15][27]

Kun ferromagneettisten kerrosten momentit ovat yhdensuuntaisia, kerrosten momenttien kanssa yhdensuuntaisten spinien omaavat elektronit läpäisevät GMR-rakenteen suhteellisen helposti kuvan 29 a) mukaisesti. Toisaalta kerrosten momenttien kanssa erisuuntaisten spinien omaavien elektronien kohdalla tapahtuu paljon sirontaa molemmissa ferromagneettisissa kerroksissa. Kerrosten momenttien kanssa yhdensuuntaisten spinien omaavien elektronien vähäisen sironnan vuoksi ne pääosin määrittävät johtavuuden, ja GMR-rakenteen resistanssi on pieni. Kun ferromagneettisten kerrosten momentit ovat vastakkaissuuntaisia, kuten kuvassa 29 b),

kaikkien elektronien kohdalla tapahtuu sirontaa joko ensimmäisessä tai toisessa ferromagneettisessa kerroksessa. Tämän vuoksi GMR-rakenteen resistanssi on suuri. [15][27]



Kuva 29. GMR-ilmiö ferromagneettisten kerrosten magneettisten momenttien ollessa yhdensuuntaiset (vasemmalla) ja vastakkaissuuntaiset (oikealla)

Koska GMR-ilmiössä resistanssiin vaikuttava elektronien sironta on merkittävässä osassa, kerrosten täytyy olla ohuempia kuin keskimääräinen elektronien vapaasti kulkema matka materiaalissa. Tyypillisesti kerrokset ovat korkeintaan 10 nm paksuja, koska monissa ferromagneettisissa materiaaleissa keskimääräinen elektronien kulkema matka on kymmeniä nanometrejä. [15][27]

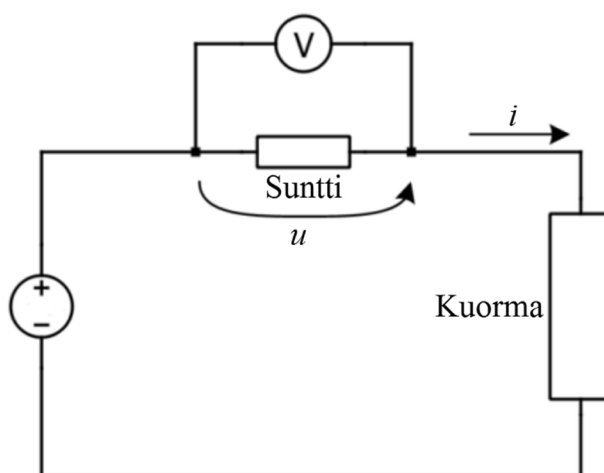
7.2.2 Edut ja haitat

GMR-anturilla voidaan mitata sekä tasa- että vaihtovirtaa kuten Hall- ja Fluxgate-antureilla. Etuina GMR-anturilla on suuri herkkyys ja resoluutio. Herkkyys on noin 10 kertaa suurempi verrattuna Hall-antureihin ja mahdollistaa jopa 1 mG magneettivuon tiheyksien mittaamisen. Anturin suuri herkkyys ja resoluutio yhdistettynä hyvään lineaarisuuteen sekä pieneen lämpötila-ajautumiseen mahdollistavat pienten virtojen mittaamisen. Lisäksi GMR-anturilla on suuri kaistanleveys sekä alhainen tehonkulutus. GMR-anturin materiaalien, melko yksinkertaisen rakenteen ja valmistusmenetelmien vuoksi sen pieni koko sekä edullinen hinta ovat lisänneet sen yleistymistä monissa sovelluksissa. Rajoitteita GMR-anturille asettaa kuitenkin ylikuormitustilanteet, sillä ylikuormitus voi muuttaa anturin toimintaa pysyvästi eikä sitä voida palauttaa alkuperäiseen tilaan Hall-anturien tapaan. [30][31]

7.3 Suntti

7.3.1 Toimintaperiaate

Suntti on tarkkuusvastus, ja sunttivirta-anturi koostuu sekä tarkkuusvastuksesta että mittauselektroniikasta. Kuvassa 30 on esitetty virranmittaus suntilla. Suntti, jonka resistanssi suurivirtaisissa sovelluksissa on tyypillisesti $10 \dots 100 \mu\Omega$, on kytketty sarjaan mitattavan virtapiirin kanssa. Virtapiirissä kulkeva mitattava virta i saa aikaan jännitehäviön u suntin yli. Jännitehäviötä mittaamalla saadaan selvitettyä virran suuruus, sillä jännitehäviö on Ohmin lain $u = Ri$ mukaisesti suoraan verrannollinen mitattavaan virtaan. [24]



Kuva 30. Virranmittaus suntilla (muokattu lähteestä [4])

7.3.2 Edut ja haitat

Suntti on hyvin yleinen virranmittausmenetelmä sen yksinkertaisen rakenteen vuoksi, ja sitä voidaan käyttää sekä tasa- että vaihtovirran mittaamisessa. Sunteissa käytetään resistiivisiä materiaaleja, kuten mangaanikuparia (MnCu) tai nikkelikromia (NiCr), joiden lämpötilakerroin on pieni. Tämän vuoksi sunttien lämpötilariippuvuus on pientä. [24]

Suntti on osa mitattavaa virtapiiriä, minkä vuoksi tällä virranmittausmenetelmällä on muutamia haittoja. Ensinnäkin suntti saa aikaan merkittävästi tehohäviöitä. Tehohäviö Ohmin lain $P = Ri^2$ mukaisesti kasvaa suhteessa virran neliöön, jonka vuoksi se rajoittaa suntin käyttöä suurivirtaisissa sovelluksissa. Toinen haitta suntin käytössä on galvaanisen erotuksen puuttuminen mitattavan virran ja mittauspiirin väliltä. Tämän vuoksi mittauksessa on käytettävä erillistä galvaanista erotinta, mikä kasvattaa

kustannuksia sekä heikentää kaistanleveyttä ja tarkkuutta. Näiden lisäksi suntin haittana on sen huono tarkkuus pienillä virroilla. Pienestä resistanssista johtuen suntin yli muodostunut jännite on pieni, jolloin kohina ja termojännite heikentävät mittaustarkkuutta. [24]

7.4 Rogowski-kela

7.4.1 Toimintaperiaate

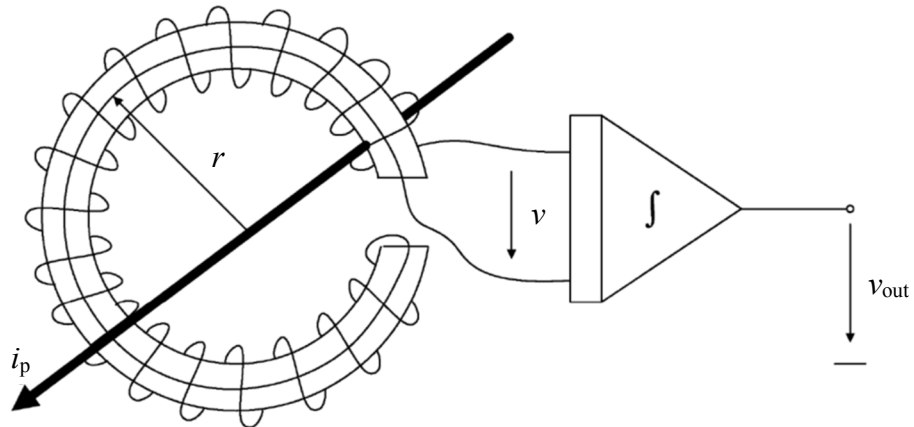
Rogowski-kelan toiminta perustuu Faradayn induktiolakiin. Kuvassa 31 on esitetty Rogowski-kelan avulla tapahtuva virranmittausmenetelmä. Siinä mitattavan virtajohtimen ympärille on asetettu ei-magneettinen rengas, jonka ympärille on kierretty toroidiksi toisiokäämi. Toisiokäämin kierrosten lukumäärä on tyypillisesti satoja tai tuhansia kierroksia. Mitattavassa johtimessa kulkeva virta i_p indusoi toisiokäämin päiden välille jännitteen v . Tämä jännite on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran i_p aikaderivaattaan siten että

$$v = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} = -\frac{NA\mu_0}{2\pi r} \frac{di_p}{dt} \quad (41)$$

missä A on toisiokäämin muodostama poikkipinta-ala, r Rogowski-kelan säde ja N toisiokäämin kierrosten lukumäärä. Koska tasavirran derivaatta on nolla, Rogowski-kelalla ei voi mitata tasavirtaa. Aikaderivaatan vuoksi Rogowski-kelaan tulee kytkeä integraattori, jolloin ulostuloksi v_{out} saadaan

$$v_{out} = -\frac{NA\mu_0}{2\pi r} k \int_t \frac{di_p}{dt} \cdot dt + v_{out}(0) = -k \frac{NA\mu_0}{2\pi r} i_p + v_{out}(0) \quad (42)$$

missä k on integrointivakio. [24]



Kuva 31. Virranmittaus Rogowski-kelalla (muokattu lähteestä [24])

7.4.2 Edut ja haitat

Rogowski-kela on yksinkertainen ja tarkka virranmittausmenetelmä. Sen toiminta perustuu magneettivuon mittaamiseen, joten se luonnostaan muodostaa galvaanisen erotuksen mitattavan virran ja anturin välille. Tämän vuoksi erillistä galvaanista erotusta ei tarvita. Rogowski-kela ei sisällä magneettisesta materiaalista valmistettua sydäntä, joka aiheuttaisi ongelmia johtuen hystereesistä, häviöistä, saturaatiosta ja remanenssista. Tämän vuoksi Rogowski-kela on hyvin lineaarinen koko virranmittausalueella, ja sillä voidaan mitata suuria virtoja. Lisäksi ei-magneettisesta sydäimestä johtuvan pienen induktanssin vuoksi kelan kaistanleveys on laaja, jolloin sitä voidaan käyttää transienttivirtojen mittaamiseen esimerkiksi suojaustoiminnoissa. [24]

Rogowski-kelalla on myös muutamia haittoja. Ensinnäkin sillä on mahdollista mitata ainoastaan vaihtovirtaa tai virtapulsseja. Se ei sovellu tasavirran mittaamiseen, sillä kuten luvussa 7.4.1 todettiin, kelan toiminta perustuu virran ympärilleen luoman magneettivuon muutoksen havaitsemiseen. Toiseksi Rogowski-kela ei tuota suoraan mitattavaan virtaan verrannollista jännitettä, vaan vaatii integraattorin, mikä voi heikentää mittaustarkkuutta. Kela on myös herkkä ulkoisille magneettisille hajakentille, jonka vuoksi häiriöinen ympäristö voi heikentää sen mittaustarkkuutta. [24]

7.5 Virtamuuntaja

7.5.1 Toimintaperiaate

Virtamuuntajan rakenne vastaa hyvin paljon luvussa 7.4 esitettyä Rogowski-kelan rakennetta, eli siinä on yksi ensiökäämin kierros ja useita toisiokäämin kierroksia. Poikkeuksena Rogowski-kelaan, virtamuuntajassa ei-magneettisen sydämen on korvannut magneettisesta materiaalista valmistettu sydän. Mitattava vaihtovirta i_p muodostaa ympärillä olevaan sydämeen muuttuvan magneettivuon. Sydämen magneettivuo puolestaan saa aikaan toisiokäämiin virran

$$i_s = i_p \frac{N_1}{N_2} \quad (43)$$

missä N_1 on ensiökäämin kierroslukumäärä ja N_2 toisiokäämin kierroslukumäärä. Tyypillisesti ensiökäämin kierroslukumäärä N_1 on yksi. [24]

7.5.2 Edut ja haitat

Samoin kuin Rogowski-kela, virtamuuntaja saa aikaan galvaanisen erotuksen mitattavan virran ja muuntajan ulostulon välille. Toisin kuin Rogowski-kelalla, virtamuuntajalla ulostulo on suoraan verrannollinen mitattavaan virtaan, joten se ei vaadi integraattoria, joka voisi heikentää mittaustarkkuutta.

Virtamuuntajalla voidaan mitata ainoastaan vaihtovirtaa, kuten Rogowski-kelalla. Magneettisesta materiaalista valmistettu sydän lisää häviöitä ja hystereesistä johtuen kyllästyy helposti suurilla magneettikentänvoimakkuuksilla.

7.6 Eri virranmittausmenetelmien yhteenveto

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty yhteenvetona tyypilliset ominaisuudet eri virranmittausmenetelmille, jotka soveltuvat noin 1000 A virranmittaukseen 6 x 40 mm virtakiskosta. Taulukoista nähdään että kompensoimaton avoimen magneettipiirin Hall-anturi on erittäin hyvä vaihtoehto verrattuna muihin virranmittausmenetelmiin. Sillä on etuina erittäin pieni koko ja hinta. Myös tehonkulutus on pieni erityisesti sunttiin ja virtamuuntajaan verrattuna. Kaistanleveys kuitenkin jää 120 kHz:iin, kun se parhaimmillaan muilla menetelmillä on useita megahertsejä. 120 kHz on kuitenkin hyvä ja useimpiin sovelluksiin riittävä. Myöskään tarkkuus ei anturilla yllä aivan muiden virranmittausmenetelmien tasolle.

Taulukko 2. Yhteenveto virranmittausmenetelmien eduista ja haitoista

Virranmittausmenetelmä	Edut	Haitat
Kompensoimaton avoimen magneettipiirin Hall-anturi	DC ja AC virranmittaus Galvaaninen erotus Hinta Koko Tehonkulutus Virranmittausalue Ylikuormituksesta palautuminen	Herkkä ulkoisille häiriöille Tarkkuus
Kompensoimaton suljetun magneettipiirin Hall-anturi	DC ja AC virranmittaus Galvaaninen erotus Häiriösietoisuus Tehonkulutus	Magneettisydämen rajoitteet Tarkkuus
Kompensoitu Hall-anturi	DC ja AC virranmittaus Galvaaninen erotus Häiriösietoisuus Tarkkuus	Koko Kompensointipiiri lisää kokoa ja tehonkulutusta Magneettisydämen rajoitteet
Fluxgate	DC ja AC virranmittaus Galvaaninen erotus Resoluutio Tarkkuus	Koko Kompensointipiiri lisää kokoa ja tehonkulutusta Magneettisydämen rajoitteet Pieni virranmittausalue
GMR	DC ja AC virranmittaus Galvaaninen erotus Hinta Kaistanleveys Koko Resoluutio Tarkkuus Tehonkulutus	Ei palaudu ylikuormituksesta
Suntti	DC ja AC virranmittaus Tarkkuus suurilla virroilla	Ei galvaanista erotusta Ei palaudu ylikuormituksesta Koko Tarkkuus pienillä virroilla Tehohäviö
Rogowski-kela	Galvaaninen erotus Kaistanleveys Tarkkuus Virranmittausalue Ylikuormituksesta palautuminen	Ei DC virranmittausta Herkkä ulkoisille häiriöille Integraattori
Virtamuuntaja	Galvaaninen erotus Tarkkuus	Ei DC virranmittausta Herkkä ulkoisille häiriöille Koko Magneettisydämen rajoitteet Tehohäviö

Taulukko 3. *Virranmittausmenetelmien tyypilliset ominaisuudet*

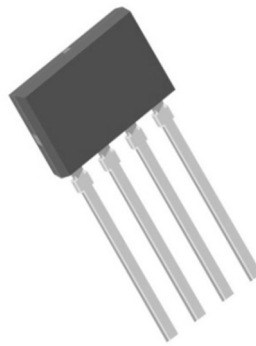
Virranmittaus- menetelmä	Tehonkulutus	Kaistanleveys	Koko [mm]	Tarkkuus¹ [%]	Hinta [€]
Kompensoimaton avoimen magneettiirin Hall-anturi	< 150 mW	DC ... 120 kHz	2 ... 5	±1 ... 2	0,5 ... 5
Kompensoimaton suljetun magneettiirin Hall-anturi	< 150 mW	DC ... 25 kHz	> 60	±1 ... 2	30 ... 50
Kompensoitu Hall-anturi	> 500 mW	DC ... 200 kHz	> 100	±0,1 ... 1	> 50
Fluxgate	300 ... 500 mW	DC ... 200 kHz	> 100	±0,01 ... 1	> 100
GMR	< 150 mW	DC ... 20 MHz	2 ... 5	±0,05 ... 2	0,5 ... 5
Suntti	$P = RI^2$	DC ... 10 MHz	> 100	±0,5 ... 2	> 30
Rogowski-kela	> 500 mW	10 Hz ... 50 MHz	> 60	±0,2 ... 2	> 100
Virtamuuntaja	1 ... 6 W	50 Hz ... 20 kHz	> 120	±0,05 ... 1	> 40

¹ Tarkkuus sisältää nollapistepoikkeaman sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirheen

8. VIRRANMITTAUS ALLEGRO A1363 IC HALL-ANTURILLA

8.1 Tutkittava Hall-anturi

Tässä työssä tutkitaan Allegro A1363 IC Hall-anturin soveltuvuutta virtakiskon virranmittaukseen staattisten ja dynaamisten suorituskykymittausten avulla. Kyseinen anturi valittiin tutkimusten kohteeksi sen laajan kaistanleveyden ja hyvän tarkkuuden vuoksi. Kyseistä anturia on saatavissa neljä erilaista versiota, jotka eroavat toisistaan herkkyiden suhteen. Tutkittavaksi Hall-anturiksi valittiin näistä herkin versio A1363LKTTN-10-T. Anturi on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Allegro A1363 Hall-anturi [32]

A1363 Hall-anturin ulostulo on lineaarinen ja analoginen. Anturin sisältämän lämpötilakompensoinnin vuoksi sen tarkkuuden tulisi pysyä hyvänä koko toimintalämpötila-alueella. Alla on lueteltu kyseisen anturin tärkeimpiä ominaisuuksia [32]:

- Kaistanleveys: 120 kHz
- Käyttölämpötila-alue: -40 ... 150 °C
- Käyttöjännite: +5 V
- Vasteaika: 3,7 μs
- Herkkyys: 9,6 mV/G ennen ohjelmointia (säädetävissä alueella 6,4 ... 14 mV/G)
- Nollapistepoikkeama (suhteessa +5 V käyttöjännitteeseen): ±1 %
- Lineaarisuusvirhe: ±1 %
- Vahvistusvirhe (suhteessa +5 V käyttöjännitteeseen): ±1,5 %

Hall-anturin ulostulo on riippuvainen anturin käyttöjännitteestä ja herkkyydestä sekä magneettivuon tiheydestä. Hall-anturilla mitattavan magneettivuon tiheydeksi saadaan

$$B = \frac{(u_m - u_{m0})}{G} \quad (44)$$

missä u_m on ulostulojännite, kun $B > 0$, u_{m0} ulostulojännite, kun $B = 0$, ja G anturin herkkyys. Datalehdessä ilmoitettu oletusherkkyys A1363 Hall-anturille on 9,6 mV/G.

Hall-anturilla mitattavaksi virraksi i_m saadaan

$$i_m = x \cdot B \quad (45)$$

missä x on kerroin, mikä riippuu muun muassa Hall-anturin etäisyydestä mitattavaan virtakiskoon tai -johtimeen ². Käytännössä kyseinen kerroin on määritettävä kalibrointivaiheessa.

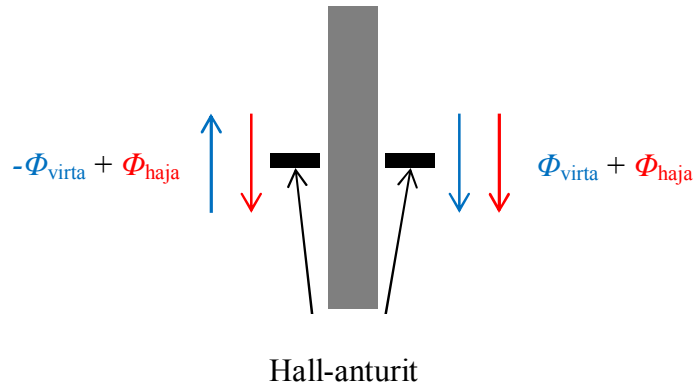
A1363 Hall-anturi on ohjelmoitava, joten sen herkkyyttä on mahdollista muuttaa. Anturin oletusherkkyys on riittävä tässä työssä suoritettavia mittauksia varten, joten ohjelmointimahdollisuutta ei hyödynnetä. Oletusherkkyydellä anturilla on mahdollista mitata maksimissaan noin 229 G magneettivuon tiheyttä. Mittauksia varten anturi juotetaan piirilevyille, ja käyttöjännite- ja maapinnan väliin kytketään 0,1 µF bypass kondensaattori tasaamaan anturille syötettävää käyttöjännitettä.

8.2 Ulkoisen magneettikentän kompensointi

Allegro A1363 Hall-anturi on avoimen magneettipiirin anturi, joten siinä ei ole magneettisesta materiaalista valmistettua sydäntä. Tämän vuoksi kyseinen anturi on hyvin herkkä ulkoisten magneettisten hajakenttien vaikutukselle. Kuten luvussa 6 ilmeni, erilaisten magneettisesta materiaalista valmistettujen suojien käyttö magneettisten hajakenttien vaimentamiseksi ei ole käytännöllistä, koska ne vääristävät virtakiskoa ympäröivää magneettikenttää ja siten myös mittaustulosta. Magneettikentän ohjaaminen magneettisesta materiaalista valmistetun sydämen avulla, eli suljettuun magneettipiiriin perustuvalla ratkaisulla, voisi puolestaan suurilla virroilla aikaansaada sydänmateriaalin saturoitumista.

Yksi menetelmä ulkoisen magneettikentän kompensoimiseksi on differentiaalinen kytkentä. Differentiaalisessa kytkennässä käytetään kahta Hall-anturia yhtä mitattavaa virtaa kohti. Anturit sijoitetaan virtakiskon vastakkaisille puolille samansuuntaisesti kuvan 33 mukaisella tavalla.

² Ideaalisessa tilanteessa vakiokerroin $x = \mu_0 4\pi r$, missä r on anturin etäisyys virtajohtimen keskipisteestä.



Kuva 33. Ulkoisen magneettikentän kompensointi kahdella Hall-anturilla

Ilman ulkoista magneettista hajakenttää molemmat Hall-anturit mittaavat ainoastaan virran ympärilleen muodostamaa magneettikenttää. Magneettivuo Φ_{virta} on samansuuruinen mutta vastakkaissuuntainen virtakiskon eripuolilla. Koska Hall-anturit ovat keskenään samansuuntaisia, niiden mittaustulokset ovat itseisarvoltaan yhtä suuret mutta vastakkaismerkkiset. Kun ulkoisen hajakentän häiriölähde on riittävän etäällä virtakiskosta, sen vaikutus virtakiskon molemmilla puolilla, lähellä virtakiskoa, on lähes samansuuruinen. Tämä hajavuo Φ_{haja} on samansuuntainen virtakiskon kummallakin puolella, joten se pienentää kokonaismagneettivuon tiheyttä toisella puolella ja kasvattaa sitä vastakkaisella puolella. Differentiaalikytkennällä saadaan mitattua Hall-anturien mittaamien magneettivuon tiheyksien erotus, jolloin ulkoisen hajakentän vaikutus kumoutuu. Tämä voidaan matemaattisesti esittää seuraavalla tavalla.

$$\frac{B_1 - B_2}{2} = \frac{(B_{virta} + B_{haja}) - (-B_{virta} + B_{haja})}{2} = B_{virta} \quad (46)$$

missä B_1 ja B_2 ovat kokonaismagneettivuon tiheydet Hall-anturien mittauskohdissa, B_{virta} virtakiskon muodostama magneettivuon tiheys Hall-anturin mittauskohdissa ja B_{haja} ulkoisen hajavuo tiheys Hall-anturin mittauskohdissa.

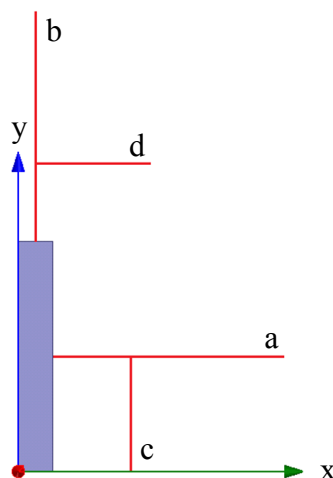
9. SIMULOINNIT

Hall-anturilla mitataan virtakiskossa kulkevaa virtaa epäsuorasti virran ympärilleen muodostamaa magneettikenttää hyödyntäen. Mittauspisteen magneettivuon tiheys riippuu muun muassa virtakiskon muodosta, virran suuruudesta sekä Hall-anturin sijainnista suhteessa virtakiskoon. Lisäksi ulkoinen magneettinen hajakenttä ja ferromagneettiset materiaalit vaikuttavat mittauspisteen magneettivuon tiheyteen. Virtakiskoa ympäröivän magneettikentän käyttäytymistä ja magneettivuon tiheyttä eri etäisyyksillä virtakiskosta tutkitaan simuloinnilla. Simuloinnissa käytetään ANSYS Maxwell 16.0 ohjelmistoa.

9.1 Simuloinnissa käytetty rakenne

Simuloinnin tarkoituksena on selvittää magneettikentän käyttäytymistä virtakiskon ympärillä. Simuloinnissa ollaan kiinnostuneita virtakiskon poikkileikkaustasossa tapahtuvista magneettikentän muutoksista, joten virtakisko voidaan ajatella äärettömän pitkäksi, ja simulointi voidaan suorittaa xy-tasossa eli 2D-tilassa.

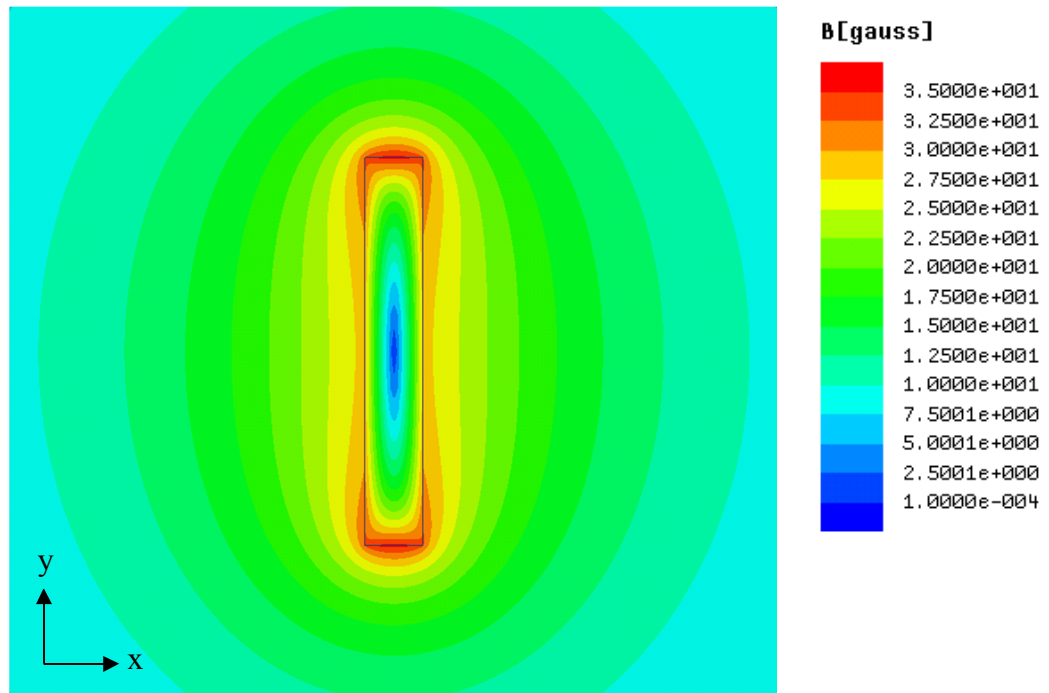
Simuloinnissa käytetään vastaavaa 6 x 40 mm kuparikiskoa kuin mittauksissa. Kuparikiskoa ympäröiväksi aineeksi simuloinnissa asetetaan tyhjiö. Kuvassa 34 on esitetty poikkileikkaus virtakiskosta. Punaiset viivat (a – d) kuvaavat mittausakseleita, joihin tulevissa simulointi- ja mittaustulosten tarkasteluissa viitataan.



Kuva 34. Virtakiskon poikkileikkaus ja simulointiakselit (a – d)

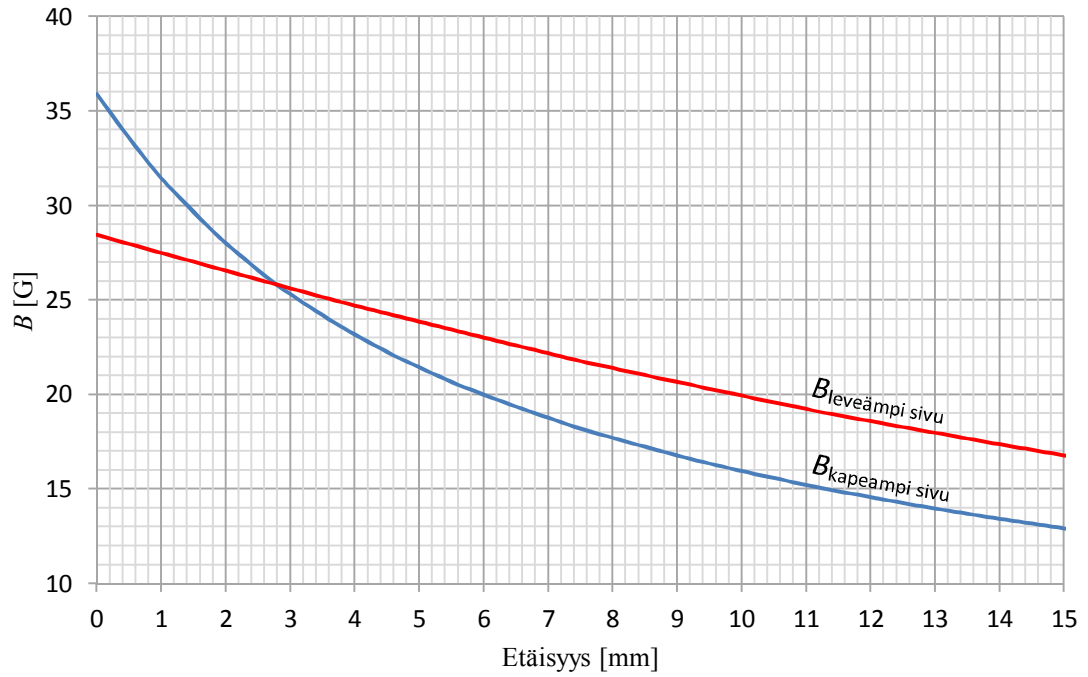
9.2 Virtakiskoa ympäröivä magneettikenttä

Kuvassa 35 on esitetty magneettivuon tiheys virtakiskon ympärillä xy-tasossa. Virtakiskon virta on 200 A_{DC} .



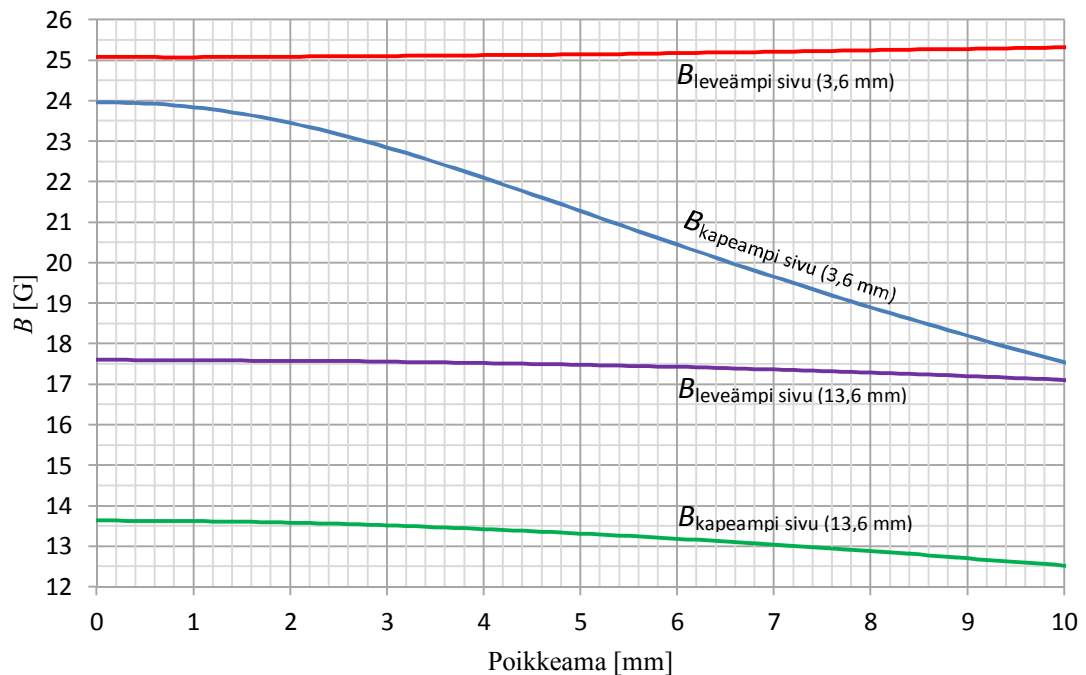
Kuva 35. Virtakiskoa ympäröivä magneettivuon tiheys ($I = 200\text{ A}_{\text{DC}}$)

Kuvassa 36 on esitetty magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskon pinnasta. Mittaukset suoritettiin kuvassa 34 esitetyillä a- ja b-akseleilla. Punainen viiva ($B_{\text{leveämpi sivu}}$) kuvaa magneettivuon tiheyttä a-akselilla ja sininen viiva ($B_{\text{kapeampi sivu}}$) magneettivuon tiheyttä b-akselilla.



Kuva 36. Magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskosta ($I = 200 \text{ A}_{DC}$)

Kuvassa 37 on esitetty magneettivuon tiheyden käyttäytyminen, kun etäisyys virtakiskoon pysyy vakiona mutta tarkastelupiste poikkeaa virtakiskon sivun keskikohdasta. Mittausakseleina käytettiin kuvassa 34 esitettyjä c- ja d-akseleita 3,6 mm ja 13,6 mm etäisyyksillä virtakiskosta. Sininen ja punainen viiva kuvaavat magneettivuon tiheyttä 3,6 mm etäisyydellä virtakiskon kapeammalla ja leveämmällä sivulla. Vihreä ja violetti viiva kuvaavat magneettivuon tiheyttä 13,6 mm etäisyydellä.

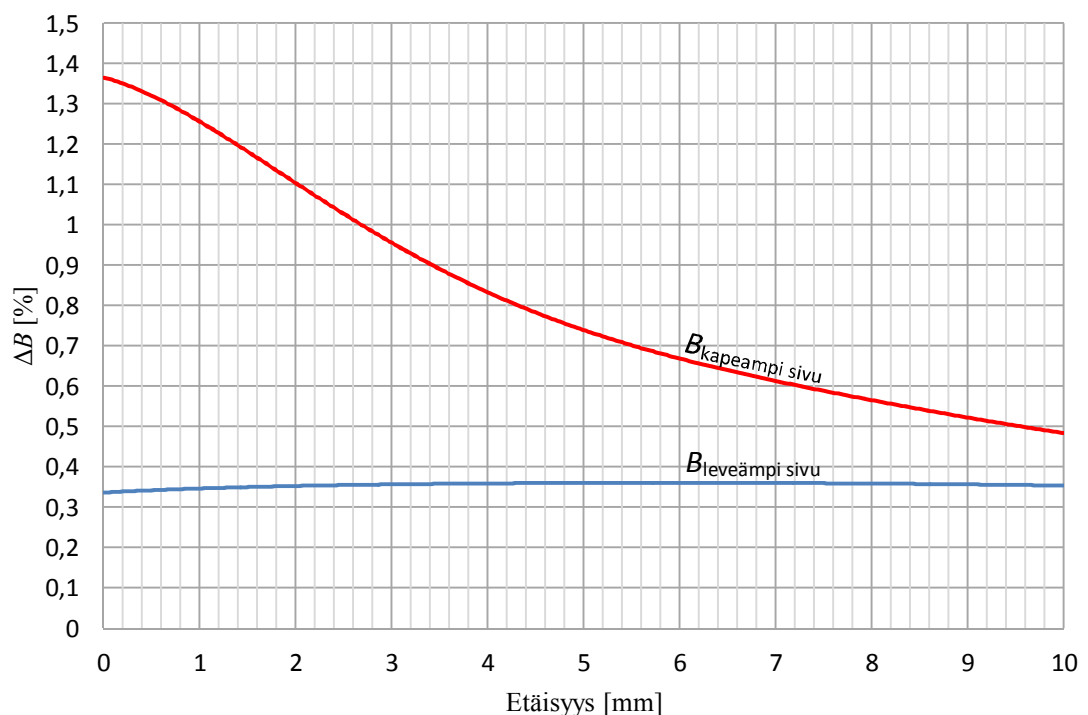


Kuva 37. *Magneettivuon tiheys poikkeaman funktiona virtakiskon keskikohdasta, 3,6 mm ja 13,6 mm etäisyydellä virtakiskosta ($I = 200 A_{DC}$)*

Kuvista 35, 36 ja 37 nähdään että etäisyyden vaikutus magneettivuon tiheyteen virtakiskon leveämmällä sivulla on huomattavasti pienempi virtakiskon kapeampaan sivuun verrattuna. Magneettivuon tiheyden muutos etäisyyden funktiona virtakiskoon on lähes lineaarinen virtakiskon leveämmällä sivulla, kuten kuva 36 osoittaa. Kapeammalla sivulla magneettivuon tiheyden muutos etäisyyden funktiona on huomattavasti suurempaa ja epälineaarisempaan noin 8 mm etäisyydelle saakka, jonka jälkeen muutos pienenee ja on lähes lineaarista. Tilanne on vastaava myös magneettivuon tiheyden muutoksessa poikkeaman suhteen virtakiskon sivujen keskikohdasta. Kuva 37 osoittaa että magneettivuon tiheys pienenee huomattavasti kapeammalla sivulla, kun tarkastelupistettä poikkeutetaan sivun keskikohdasta. Erityisesti tämä on nähtävissä lähellä virtakiskoa. Esimerkiksi 3 mm poikkeama 3,6 mm etäisyydellä virtakiskon kapeammalta sivulta saa aikaan noin 1 G muutoksen

magneettivuon tiheyteen. Leveämmällä sivulla vastaava tilanne saa aikaan ainoastaan 0,02 G muutoksen. Suuremmilla etäisyyksillä virtakiskosta poikkeama virtakiskon keskikohdasta vaikuttaa magneettivuon tiheyteen vähemmän, mutta myös magneettivuon tiheys on silloin pienempi.

Kuvassa 38 on esitetty magneettivuon tiheyden suhteellinen muutos, kun tarkastelupisteen kohtisuora etäisyys virtakiskoon muuttuu 0,1 mm. Muutos tapahtuu kuvassa 34 esitetyillä a- ja b-akseleilla. Tällä simuloidaan tilannetta, jossa virtakisko värähtelee ja saa aikaan pienen muutoksen virtakiskon ja Hall-anturin väliseen etäisyyteen.



Kuva 38. 0,1 mm muutoksen vaikutus magneettivuon tiheyteen etäisyyden funktiona

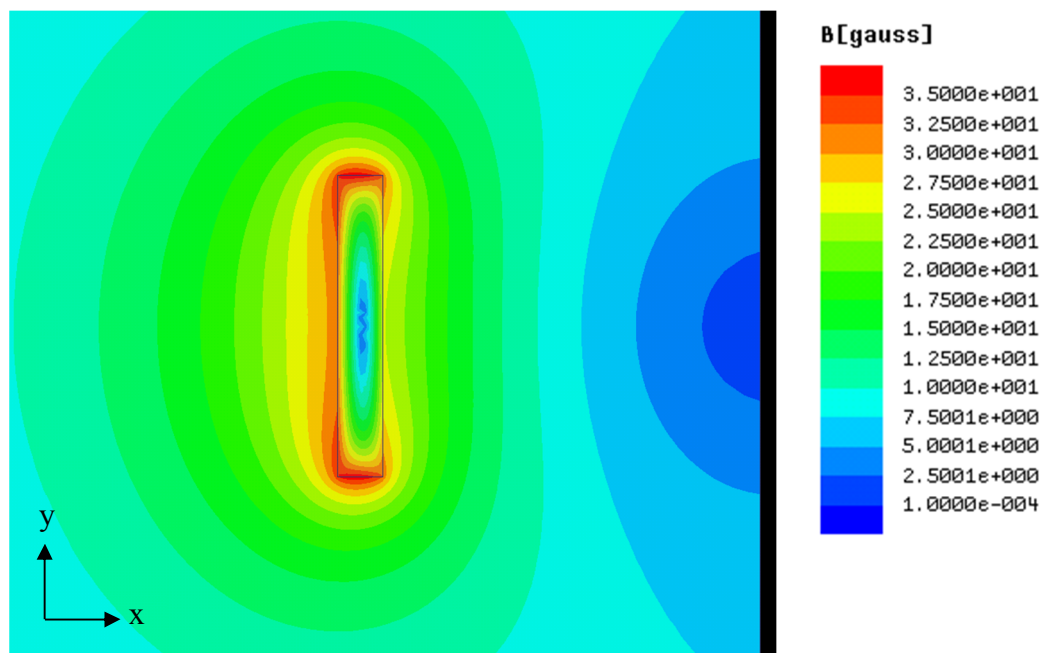
Kuvasta 38 nähdään magneettivuon tiheyden suhteellisen muutoksen käyttäytyvän hyvin eri tavoin, kun tarkastellaan leveämmällä ja kapeammalla sivulla tapahtuvaa muutosta. Leveämmällä sivulla 0 ... 10 mm etäisyydellä suhteellinen muutos pysyy lähes samana ja on noin 0,35 %. Kapeammalla sivulla suhteellinen muutos vaihtelee noin 1,36 %:sta 0,49 %:iin 0 ... 10 mm etäisyydellä.

9.3 Ferromagneettisen materiaalin vaikutus

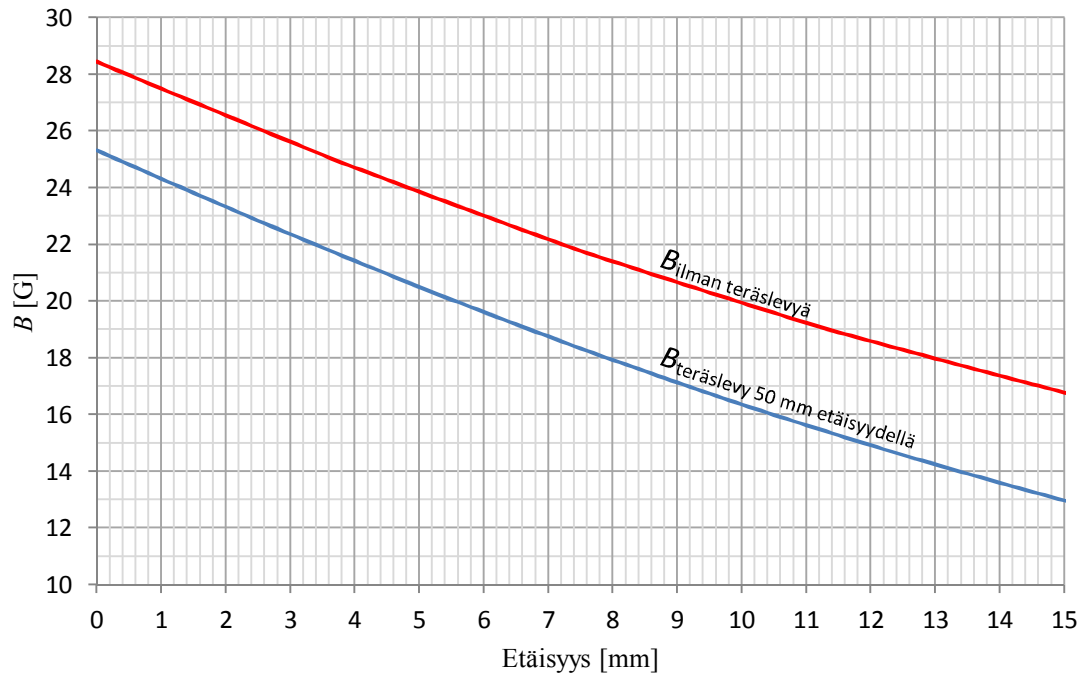
Luvussa 3.2 todettiin että ferromagneettiset aineet muuttavat magneettikenttää erittäin paljon. Seuraavan simuloinnin tarkoituksena on tutkia virtakiskon läheisyydessä olevan ferromagneettisen aineen vaikutusta virtakiskoa ympäröivään magneettikenttään.

Simuloinnissa käytetään 2 x 300 mm 1008 teräslevyä. Teräslevy asetetaan 50 mm päähän virtakiskosta. Virtakiskon virraksi asetetaan 200 A_{DC}.

Kuvassa 39 on esitetty magneettivuon tiheys virtakiskon ympärillä. Musta palkki oikealla on 2 mm paksuinen teräslevy. Teräslevy jatkuu kuvan ulkopuolelle. Kuvassa 40 on esitetty magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskon leveämmästä sivusta, eli kuvassa 34 esitetyllä a-akselilla. Sininen viiva kuvaa magneettivuon tiheyttä kun teräslevy sijaitsee 50 mm etäisyydellä ja punainen viiva magneettivuon tiheyttä ilman teräslevyä.



Kuva 39. Virtakiskoa ympäröivä magneettivuon tiheys, kun 50 mm etäisyydellä on 2 mm paksuinen teräslevy ($I = 200 \text{ A}_{DC}$)



Kuva 40. Magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskosta, kun 50 mm etäisyydellä on 2 mm paksuinen teräslevy ($I = 200 \text{ A}_{\text{DC}}$)

Kuvista 39 ja 40 nähdään teräslevyn heikentävän magneettivuon tiheyttä virtakiskon ja teräslevyn välillä. Magneettivuon tiheys pienenee noin 3 ... 4 G etäisyyksillä 0 ... 15 mm, kun teräslevy tuodaan virtakiskon lähelle. Teräslevyn lisääminen kasvattaa hieman magneettivuon tiheyttä virtakiskon vasemmalla puolella, lähellä virtakiskoa.

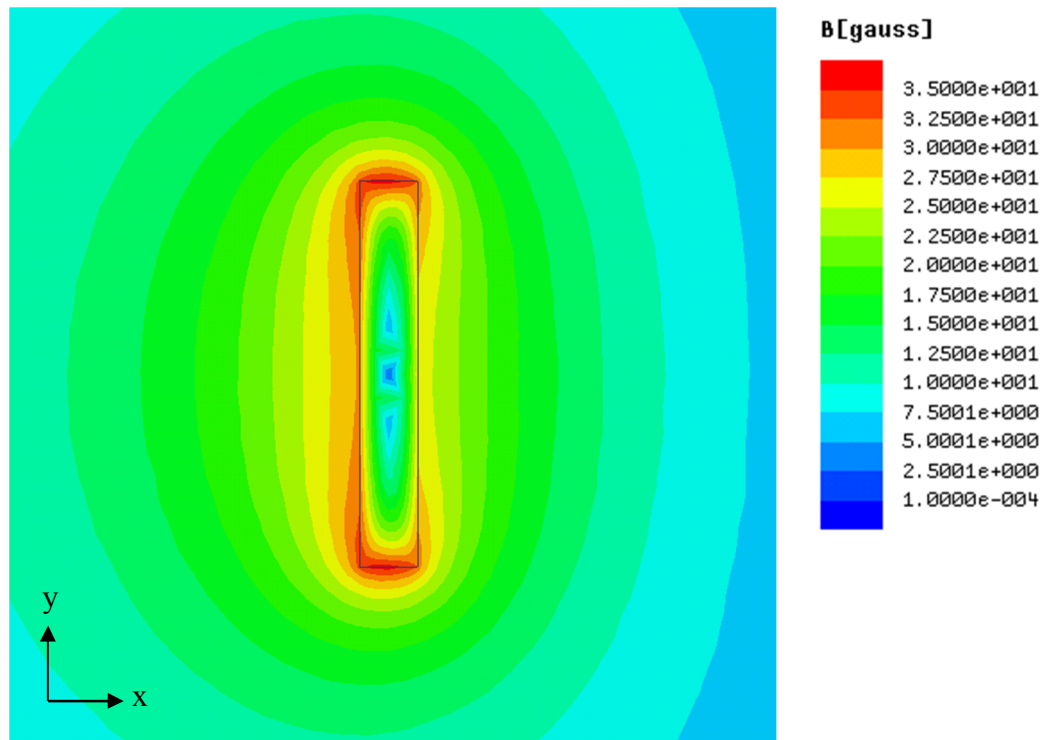
9.4 Ulkoisen magneettisen hajakentän vaikutus

Ulkoisella magneettisella hajakentällä voi olla merkittävä vaikutus Hall-anturin mittaustulosten tarkkuuteen, kuten luvussa 6.2.1 todettiin. Tutkittavassa Hall-anturissa ei ole virtakiskon ympärilleen luomaa magneettikenttää keskittävää ja ulkoista hajakenttää vaimentavaa magneettisesta materiaalista valmistettua sydäntä, jonka vuoksi hajakentällä on suora vaikutus Hall-anturilla mitattavaan magneettivuon tiheyteen.

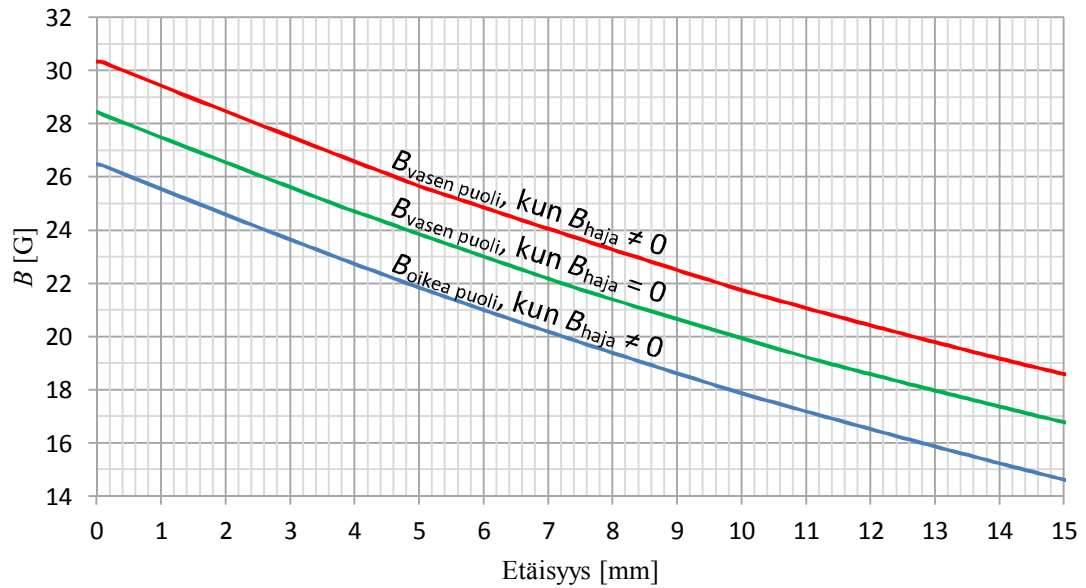
Ulkoisen hajakentän vaikutusta virtakiskoa ympäröivään magneettikenttään tutkitaan simuloimalla. Simuloinnissa 200 mm päähän virtakiskosta asetetaan toinen virtakisko, jossa kulkee samansuuruinen ja -suuntainen virta ($200 \text{ A}_{\text{DC}}$) kuin mitattavassa virtakiskossa.

Kuvassa 41 on esitetty mitattavan virtakiskon ympäröimä magneettivuon tiheys, kun kuvan ulkopuolella, virtakiskon oikealla puolella, sijaitsee toinen virtakisko. Kuvassa

42 on esitetty magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskosta edellä kuvatussa tilanteessa. Sininen viiva kuvaa magneettivuon tiheyttä virtakiskon oikealla puolella (kuvan 34 a-akseli) ja punainen viiva magneettivuon tiheyttä virtakiskon vasemmalla puolella. Vihreä viiva kuvaa virtakiskon ympärille luomaa magneettivuon tiheyttä, kun ulkoista magneettista hajakenttää ei ole.



Kuva 41. Virtakiskoa ympäröivä magneettivuon tiheys, kun 200 mm etäisyydellä sijaitsee toinen virtakisko ($I = 200 A_{DC}$)



Kuva 42. Magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona virtakiskosta, kun 200 mm etäisyydellä sijaitsee toinen virtakisko ($I = 200 \text{ A}_{\text{DC}}$)

Kuvista 41 ja 42 nähdään magneettivuon tiheyden pienenevän mitattavan virtakiskon oikealla puolella ja kasvavan vasemmalla puolella. Lähellä virtakiskoa magneettivuon tiheyden muutoksen itseisarvo on lähes sama virtakiskon eri puolilla. Suuremmilla etäisyyksillä ero magneettivuon tiheyden muutoksen itseisarvoissa kasvaa. Taulukossa 4 on esitetty magneettivuon tiheyden muutokset 1 mm ja 15 mm etäisyyksillä virtakiskon vasemmalla ja oikealla puolella.

Taulukko 4. Magneettivuon tiheyden muutos ulkoisen hajakentän vaikutuksesta

Etäisyys [mm]	Magneettivuon tiheyden muutos virtakiskon vasemmalla puolella $ \Delta B $ [G]	Magneettivuon tiheyden muutos virtakiskon oikealla puolella $ \Delta B $ [G]	Ero magneettivuon tiheyden muutoksissa virtakiskon eri puolilla $ \Delta B $ [G]
1	1,942	1,945	0,003
15	1,810	2,159	0,349

9.5 Simulointitulosten yhteenveto

Virtakiskoa ympäröivän magneettikentän simulointi tuotti selkeitä tuloksia Hall-anturin optimaalisen sijainnin määrittämiseen suhteessa virtakiskoon. Tulokset osoittavat magneettivuon tiheyden vaihtelun olevan virtakiskon leveämmällä sivulla huomattavasti kapeampaa sivua pienempää, kun tarkastelupisteen sijaintia muutetaan. Tämä pätee sekä kohtisuoralle että sivuttaissuuntaiselle etäisyyden muutokselle suhteessa virtakiskoon.

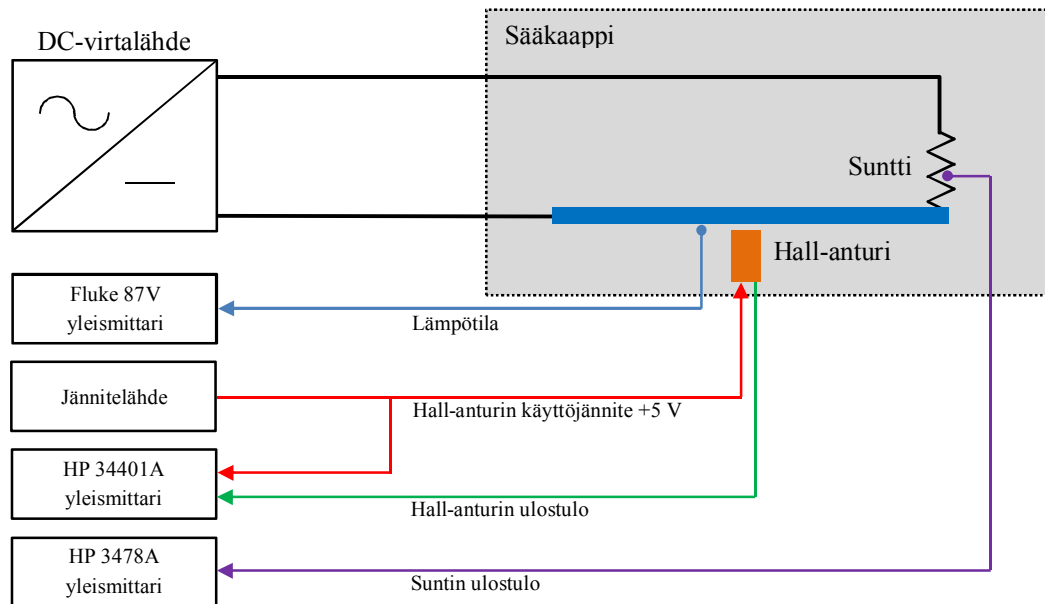
Simulointitulokset todistavat avoimen magneettipiirin Hall-anturin mittaustavan olevan häiriöherkkä. Mittauspistettä lähellä oleva ferromagneettinen materiaali tai toinen virtakisko vaikuttaa merkittävästi virtakiskoa ympäröivään magneettikenttään ja siten Hall-anturin mittaustulokseen. Häiriölähde voi olla laitteen ulkopuolella, jolloin sitä ei voida laitteen suunnittelussa ottaa huomioon. Tämän vuoksi tarkka ja luotettava virranmittaus yhdellä Hall-anturilla on lähes mahdotonta. Simulointituloksista nähdään kuitenkin että ulkoisen magneettisen hajakentän aikaansaama muutos magneettivuontiheyteen lähellä virtakiskoa, sen vastakkaisilla puolilla, on itseisarvoltaan lähes yhtä suuri. Tämä mahdollistaa luvussa 8.2 esitetyn differentiaalisen kytkennän käyttämisen.

Simulointitulosten perusteella voidaan todeta että paras sijainti Hall-anturille on virtakiskon leveämmällä puolella. Anturi tulisi sijoittaa keskelle virtakiskon leveämpää sivua eli kuvan 34 a-akselille. Tällöin esimerkiksi asennuksesta tai laitteen värähtelystä aiheutuneet pienet muutokset anturin sijainnissa eivät vaikuta merkittävästi mittaustulokseen. Mitä lähempänä anturi on virtakiskoa, sen tarkempi mittaustulos saadaan kahdella Hall-anturilla toteutetulla differentiaalisella kytkennällä. Tässä täytyy huomioda että virtakiskon ja Hall-anturin eristeväli on riittävän suuri.

10. MITTAUKSET

10.1 Mittausjärjestelyt

Hall-anturia tutkitaan mittaamalla sen staattista ja dynaamista suorituskykyä. Staattisen suorituskyvyn mittauksiin kuuluu nollapistepoikkeama sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirhe eri lämpötiloissa. Lisäksi tutkitaan Hall-anturin sijainnin vaikutusta mittaustarkkuuteen. Nollapistepoikkeama mitataan $-40 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila-alueella ja vahvistus- sekä lineaarisuusvirhe $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa.

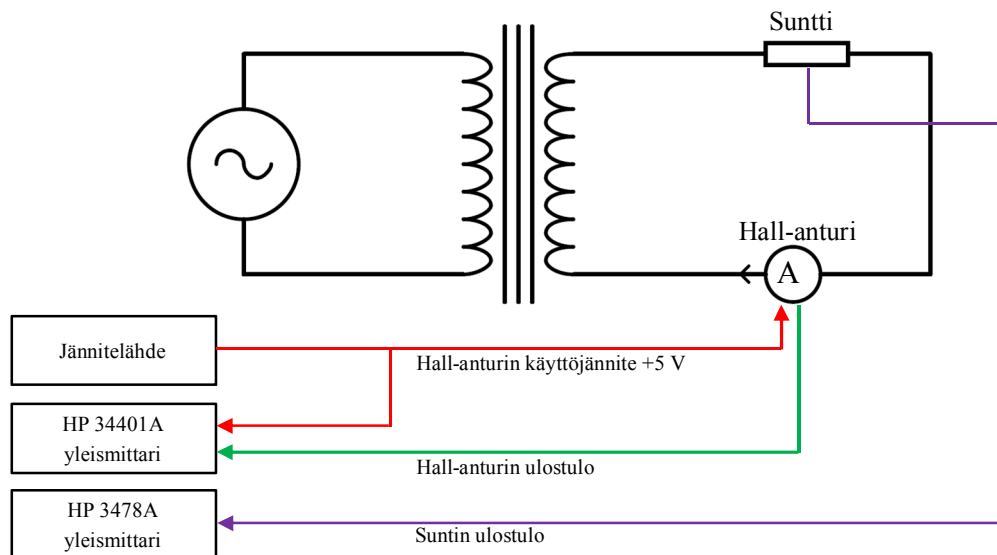


Kuva 43. Staattisen suorituskyvyn mittauskytkentä nollapistepoikkeaman sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirheen mittaamiseksi

Kuvassa 43 on esitetty staattisen suorituskyvyn mittauskytkentä Hall-anturin nollapistepoikkeaman sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirheen mittaamiseksi. Virtakisko (sininen), Allegro A1363 Hall-anturi (oranssi) ja Hilo Test WSM 600 suntti on asetettu säkaappiin, jonka lämpötilaa ja kosteutta voidaan säätää. Virtakiskon kanssa sarjaan kytketyllä suntilla suoritetaan ohjearvomittaus. Hall-anturi on asetettu 1 mm etäisyydelle virtakiskosta. Etäisyys on Hall-anturin reunan ja virtakiskon välinen etäisyys. Hall-elementti sijaitsee anturin keskellä, joten Hall-elementin keskikohta on $1 \text{ mm} + 2,6 \text{ mm} = 3,6 \text{ mm}$ etäisyydellä virtakiskosta. Virtakiskoon on kaapeleilla

kytketty DC-virtalähde, jolla saadaan aikaan maksimissaan 1200 A tasavirtaa. Hall-anturin käyttöjännitteenä käytetään +5 V, jota mitataan, koska Hall-anturin ulostulo on verrannollinen käyttöjännitteeseen. Lämpötilaa mitataan sääkaapin omalla lämpömittarilla sekä Fluke 87V yleismittarilla, jonka lämpöanturi sijaitsee Hall-anturin läheisyydessä. Sääkaapin lämpötilamittauksen virhe 21,98 °C:ssa on $\pm 0,01$ °C. Yleismittarille valmistajan ilmoittama lämpötila-anturin virhe on $\pm 1,0$ °C. Hall-anturin signaalin ja käyttöjännitteen mittauksessa käytetyn yleismittarin virhe 10 V_{DC} mittausalueella on -0,0011 V. Suntain mittausvirhe 10 A_{DC} virralla on -8 mA ja 100 A_{DC} virralla -87 mA.

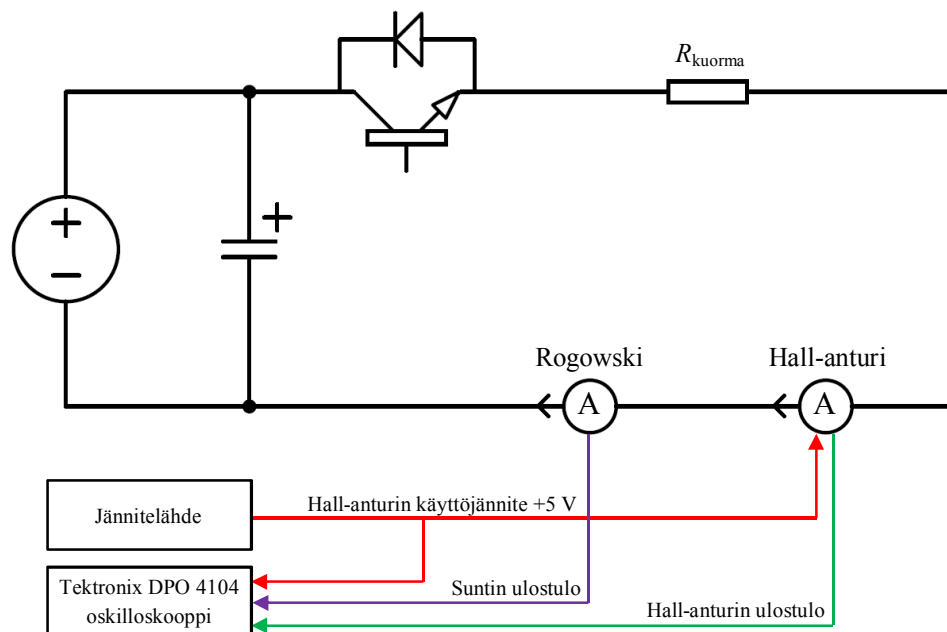
Kuvassa 44 on esitetty mittauskytkentä, jolla tutkitaan Hall-anturin sijainnin vaikutusta mittaustarkkuuteen. Samoin kuin kuvan 43 kytkennässä, suntti on kytketty virtakiskon kanssa sarjaan. Mittaukset suoritetaan Hall-anturin sijaitessa eri etäisyyksillä virtakiskosta. Virtakiskoon syötetään noin 200 A_{RMS} (50 Hz) virta, joka saadaan aikaan säädettävällä vaihtojännitelähteellä ja muuntajalla. Mittaukset suoritetaan noin 21 °C lämpötilassa. Hall-anturin signaalin ja käyttöjännitteen mittauksessa käytetyn yleismittarin virhe 10 V_{AC} mittausalueella 1 kHz taajuudella on -0,00757 V. Suntain mittausvirhe 100 A_{AC} virralla 1 kHz taajuudella on 35 mA, ja sen mittauksessa käytetyn yleismittarin mittausvirhe 300 mA_{AC} virralla 50 Hz taajuudella on 0,321 mV. Hall-anturin ja virtakiskon välisen etäisyyden mittausvirhe on $\pm 0,5$ mm.



Kuva 44. Staattisen suorituskyvyn mittauskytkentä tutkittaessa Hall-anturin sijainnin vaikutusta mittaustarkkuuteen

Hall-anturin dynaamista suorituskkyä tutkitaan mittaamalla sen vasteaikaa. Dynaamisen suorituskkyyn mittauskytkentä on esitetty kuvassa 45. Mittauksessa käytetään vaihtosuuntaajaa, jonka moottorisäätö on ohitettu. Kuvassa on esitetty yhden vaiheen ylähaaran IGBT, jota ohjaamalla virtakiskoon voidaan syöttää halutun kestoinen virtapulssi. IGBT:n ohjauksessa käytettävää hilapulssin kesto voidaan säätää 50 ns askelissa. Virtakiskoon syötettävän virtapulssin amplitudi säädetään halutuksi kuormavastusta R_{kuorma} ja välipiirijännitettä muuttamalla.

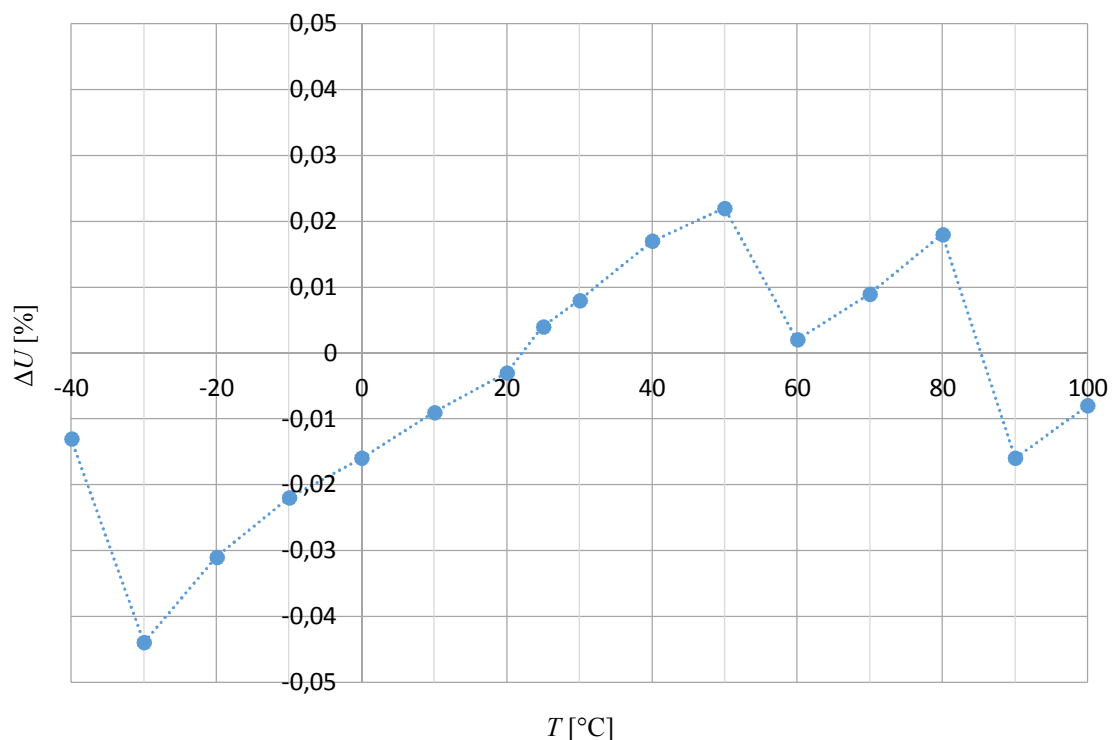
Hall-anturin käyttöjännitteenä käytetään +5 V, kuten staattisen suorituskkyyn mittauksissa. Poikkeuksena staattisen suorituskkyyn mittauksiin, dynaamisen suorituskkyyn mittauksissa ohjearvomittaus tehdään PEM CWT 15R -Rogowski-kelalla. Rogowski-kelan ulostulo sekä Hall-anturin ulostulo ja käyttöjännite mitataan Tektronix DPO 4104 -oskilloskoopilla. Hall-anturin ulostulo ja käyttöjännite mitataan erikseen, jotta voidaan estää maasilmutkaan indusoituvat häiriöt. Rogowski-kelan mittausvirhe on -1 A ja oskilloskoopin mittausvirhe $\pm 1,5$ A, joten ohjearvovirran mittausvirhe on $-1 \pm 1,5$ A. Oskilloskoopin mittausvirhe Hall-anturin mittaussignaalille on $\pm 4,3$ A ja käyttöjännitteelle ± 3 mV.



Kuva 45. Dynaamisen suorituskkyyn mittauskytkentä

10.2 Nollapistepoikkeama

Hall-anturin nollapistepoikkeamaa tutkittiin $-40 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila-alueella. Hall-anturi sijaitsi 1 mm etäisyydellä virtakiskosta. Nollapistepoikkeamamittauksissa virtakiskoon ei syötetty virtaa. Virtakiskon ja lämpökaapin lämpötilat tasattiin ennen mittausten suorittamista lähelle haluttua mittaustemperötilaa siten että lämpötilavaihtelu pysyi $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alueella mittaustemperötilasta. Kuvassa 46 on esitetty nollapistepoikkeama suhteessa Hall-anturin $+5 \text{ V}$ käyttöjännitteeseen lämpötilan funktiona.



Kuva 46. Nollapistepoikkeama suhteessa Hall-anturin käyttöjännitteeseen ($V_{cc} = +5 \text{ V}$) lämpötilan funktiona

Kuvasta 46 havaitaan Hall-anturin nollapistepoikkeaman pysyvän keskimäärin $\pm 0,03 \text{ } \%$ alueella Hall-anturin käyttöjännitteestä. $0,01 \text{ } \%$ suhteellinen virhe vastaa $9,6 \text{ mV/G}$ oletusherkkyydellä $0,052 \text{ G}$ magneettivuon tiheyttä. 1 mm etäisyydellä virtakiskosta olevalle anturille tämä tarkoittaa $0,42 \text{ A}$ virhettä mittaustulokseen. Kuvasta havaitaan lämpötila-alueella $-30 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nollapistepoikkeaman muuttuvan lähes lineaarisesti lämpötilan suhteen siten että nollapistepoikkeama kasvaa lämpötilan kasvaessa. Tämän lämpötila-alueen ulkopuolella nollapistepoikkeaman muutos ei ole lineaarinen. Tämä näkyy erityisen hyvin $50 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila-alueella, jossa nollapistepoikkeama pysyy noin $\pm 0,02 \text{ } \%$ alueella. Nollapistepoikkeama pienenee, kun se on saavuttanut noin $\pm 0,02 \text{ } \%$ tason. Tämä johtuu Hall-anturin lämpötilakompensoinnista.

Lämpötilakompensoinnilla pyritään estämään lämpötilasta aiheutuvan nollapistepoikkeaman kasvamista liian suureksi. Taulukossa 5 on esitetty absoluuttiset nollapistepoikkeamat 25 °C nimellisessä lämpötilassa sekä -40 °C ja 100 °C äärilämpötiloissa.

Taulukko 5. Absoluuttiset nollapistepoikkeamat nimellisessä lämpötilassa ja äärilämpötiloissa, kun käyttöjännite $V_{cc} = +5 V$

Lämpötila T [°C]	Nollapistepoikkeama ΔU [mV]
-40	-0,65
25	0,20
100	-0,40

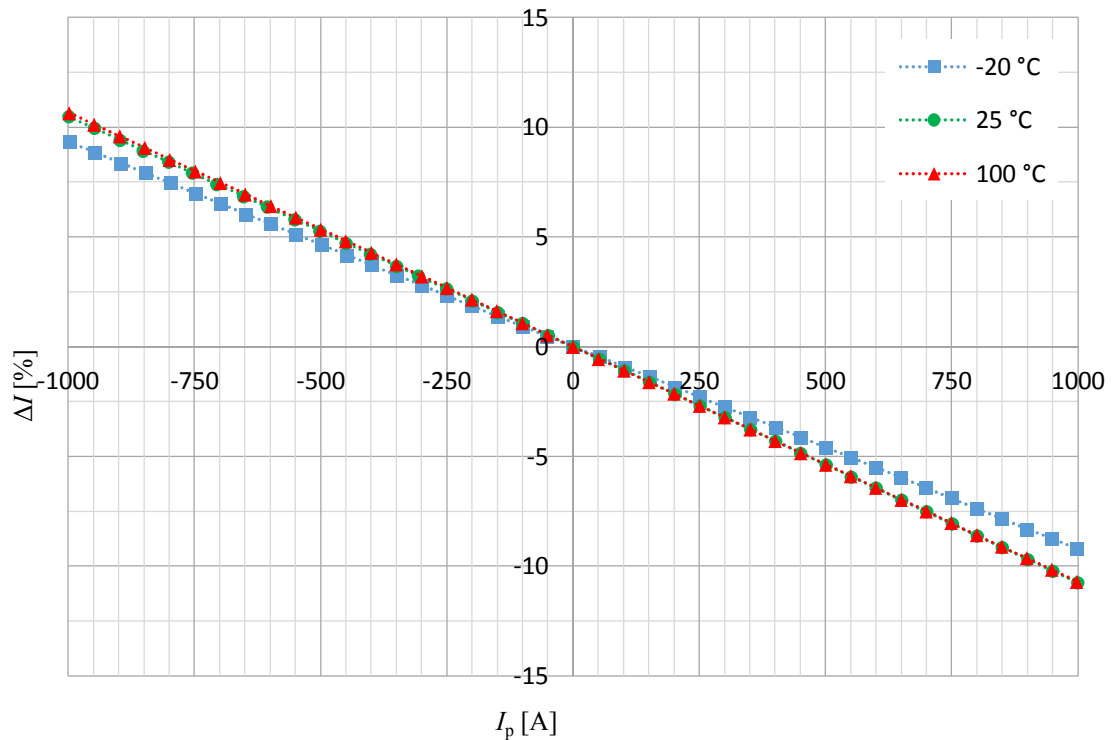
10.3 Vahvistusvirhe

Hall-anturin vahvistusvirhettä tutkittiin kolmessa eri lämpötilassa: -20 °C, 25 °C sekä 100 °C:ssa. Mittaukset suoritettiin 50 A välein virta-alueella -1000 ... 1000 A. Lämpökaapin ja virtakiskon lämpötila tasattiin lähelle mittaustemperätilaa ennen mittausten aloittamista. Mittaukset suoritettiin syöttämällä virtaa virtakiskoon lyhyen aikaa, jotta virtakiskon ja lämpökaapin lämpötilaero pysyisi mahdollisimman pienenä ja Hall-anturin lämpötila vastaisi mahdollisimman tarkasti mittaustemperätilaa. Lisäksi suurilla virroilla suntti kuumentui nopeasti, joten mittaustarkkuuden säilyttämiseksi virtaa oli mahdollista syöttää virtakiskoon vain lyhyen aikaa. Lämpökaapin lämpötila pysyi mittauksissa $\pm 0,1$ °C alueella mittaustemperätilasta. Virtakiskon lämpötila kasvoi -20 °C:ssa ja 25 °C:ssa suoritetuissa mittauksissa maksimissaan 10,7 °C, ja 100 °C:ssa vaihtelu oli $\pm 2,8$ °C alueella mittaustemperätilasta.

Hall-anturin ulostulojännitteen ja mitattavan virran välinen suhde ei ole yksikäsitteinen, koska Hall-anturi mittaa magneettivuon tiheyttä ja suntti virtakiskossa kulkevaa virtaa. Virran ja sen muodostaman magneettivuon tiheyden välinen suhde riippuu virtakiskon ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä. Vahvistusvirheen selvittämiseksi täytyi tämän vuoksi selvittää virran ja magneettivuon tiheyden välinen suhde Hall-anturin sijaitsemassa kohdassa. Virran ja magneettivuon tiheyden välinen suhde selvitettiin simuloimalla magneettivuon käyttäytymistä virtakiskon ympärillä. Tämän ja Hall-anturin vahvistuksen perusteella saatiin selville Hall-anturin mittaamaa magneettivuon tiheyttä vastaava virtakiskossa kulkeva virta. Suhteellinen mittausrvirhe

$$\Delta I = \frac{I_m - I_{offset} - I_p}{I_{max}} \cdot 100\% \quad (47)$$

missä I_m on Hall-anturilla mitattu virta, I_{offset} Hall-anturin nollapistepoikkeama, I_p suntilla mitattu virta ja I_{max} mittauksessa käytetty maksimivirta 1000 A. Suhteellinen mittausvirhe todellisen virran funktiona on esitetty kuvassa 47.



Kuva 47. Suhteellinen mittausvirhe todellisen virran funktiona

Kuvan 47 tuloksista on kompensoitu pois nollapistepoikkeama, mutta ne sisältävät vahvistusvirheen lisäksi lineaarisuusvirheen. Kuvasta nähdään Hall-anturilla olevan erittäin suuri vahvistusvirhe. Ideaalitilanteessa, eli vahvistusvirheen ollessa nolla, käyrät olisivat I_p -akselin suuntaisia. Tutkittavaa Hall-anturia ei ohjelmoitu ennen mittauksia, vaan sen herkkyytenä tulisi olla datalehden mukaan 9,6 mV/G ($T = 25\text{ °C}$). Mittaustulos osoittaa, että todellisuudessa Hall-anturin herkkyys eroaa merkittävästi tästä oletusarvosta. 25 °C:ssa, maksimivirralla mitattuna, anturin herkkyys on $9,6\text{ mV/G} \cdot (1 - 0,1075) = 8,57\text{ mV/G}$. Vahvistusvirheet -20 °C, 25 °C sekä 100 °C lämpötiloissa minimi- ja maksimivirroilla on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Vahvistusvirheet nimellisessä lämpötilassa ja äärilämpötiloissa minimi- ja maksimivirralla

Lämpötila T [°C]	Virta I [A]	Vahvistusvirhe ΔI [A]	Vahvistusvirhe ΔI [%]
-20	-997,8	93,2	9,32
-20	997,8	-92,0	-9,20
25	-999,1	104,9	10,49
25	999,2	-107,5	-10,75
100	-998,1	106,5	10,65
100	997,9	-106,9	-10,69

Hall-anturin vahvistusvirhe pysyy hyvin stabiilina 25 °C:ssa ja 100 °C:ssa suoritettujen mittausten välillä, sillä vahvistusvirheen muutos on minimivirralla 0,16 prosenttiyksikköä ja maksimivirralla 0,06 prosenttiyksikköä. Vahvistusvirhe muuttuu huomattavasti 25 °C:ssa ja -20 °C:ssa suoritettujen mittausten välillä, jossa muutos on minimivirralla -1,17 prosenttiyksikköä ja maksimivirralla 1,55 prosenttiyksikköä. -20 °C:ssa ja 100 °C:ssa suoritettujen mittausten välillä vahvistusvirheen muutos minimivirralla on 1,33 prosenttiyksikköä ja maksimivirralla -1,49 prosenttiyksikköä.

10.4 Lineaarisuusvirhe

Lineaarisuusvirhe ilmaistaan luvun 5.1.5 mukaisesti poikkeamana määritetystä ohjearvosuorasta, jolloin mittaustuloksista on kompensoitu pois nollapistepoikkeama ja vahvistusvirhe. Lineaarisuusvirhe määritetään tässä työssä päätepisteen menetelmää käyttäen, jossa ohjearvosuora on origon ja päätepisteen välinen suora. Ohjearvosuoran kulmakerroin voidaan määrittää luvussa 10.3 esitettyjen vahvistusvirheiden avulla. Ohjearvosuoran kulmakerroin

$$G_{ref} = \frac{I_m - I_{offset}}{I_p} \quad (48)$$

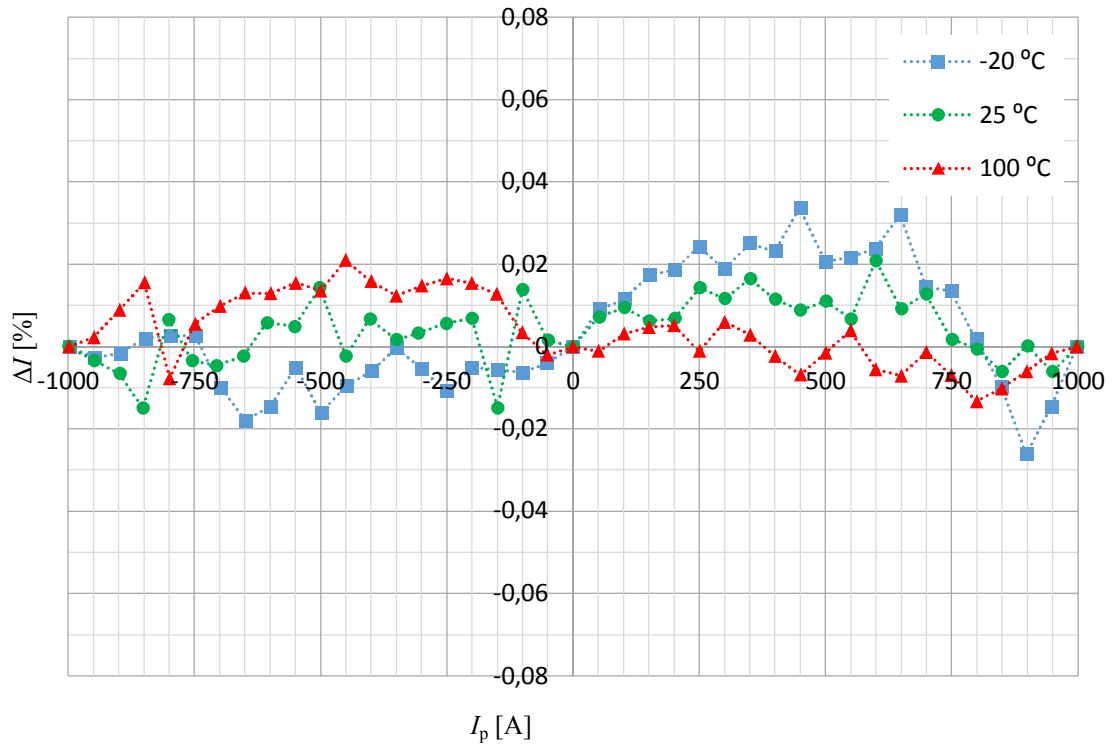
missä I_m on Hall-anturilla mitattu virta, I_{offset} Hall-anturin nollapistepoikkeama ja I_p suntilla mitattu virta. Kulmakerroin määritetään erikseen -20 °C:een, 25 °C:een ja 100 °C:een lämpötiloille sekä negatiiviselle ja positiiviselle virralla. Ohjearvosuoran yhtälöksi saadaan

$$I_{ref}(I_p) = G_{ref} \cdot I_p \quad (49)$$

Suhteellinen lineaarisuusvirhe todellisen virran funktiona on

$$\Delta I(I_p) = \frac{I_{ref}(I_p) - I_m - I_{offset}}{I_{max}} \cdot 100\% \quad (50)$$

missä I_{max} on mittauksessa käytetty maksimivirta 1000 A. Suhteellinen lineaarisuusvirhe todellisen virran funktiona on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Suhteellinen lineaarisuusvirhe todellisen virran funktiona

Päätepisteen menetelmässä lineaarisuusvirhe ilmaistaan maksimipoikkeamana origon ja päätepisteen välille määritetystä ohjearvosuorasta. Taulukossa 7 on esitetty lineaarisuusvirheet -20 °C, 25 °C ja 100 °C lämpötiloissa.

Taulukko 7. Lineaarisuusvirheet nimellisessä lämpötilassa ja äärlämpötiloissa

Lämpötila T [°C]	Lineaarisuusvirhe ΔI [A]	Lineaarisuusvirhe ΔI [%]
-20	0,34	0,034
25	0,21	0,021
100	0,21	0,021

Kuvasta 48 ja taulukosta 7 havaitaan lineaarisuusvirheiden olevan hyvin pieniä. Lineaarisuusvirheet pysyvät virran ja lämpötilan suhteen hyvin stabiileina. Suurinta vaihtelu on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, jossa lineaarisuusvirhe vaihtelee $-0,026\text{ }\%$ ja $0,034\text{ }\%$ välillä. Lineaarisuusvirhe on suurimmillaan $0,034\text{ }\%$, virran ollessa noin puolet maksimivirrasta. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa lineaarisuusvirheet ovat $\pm 0,021\text{ }\%$ alueella.

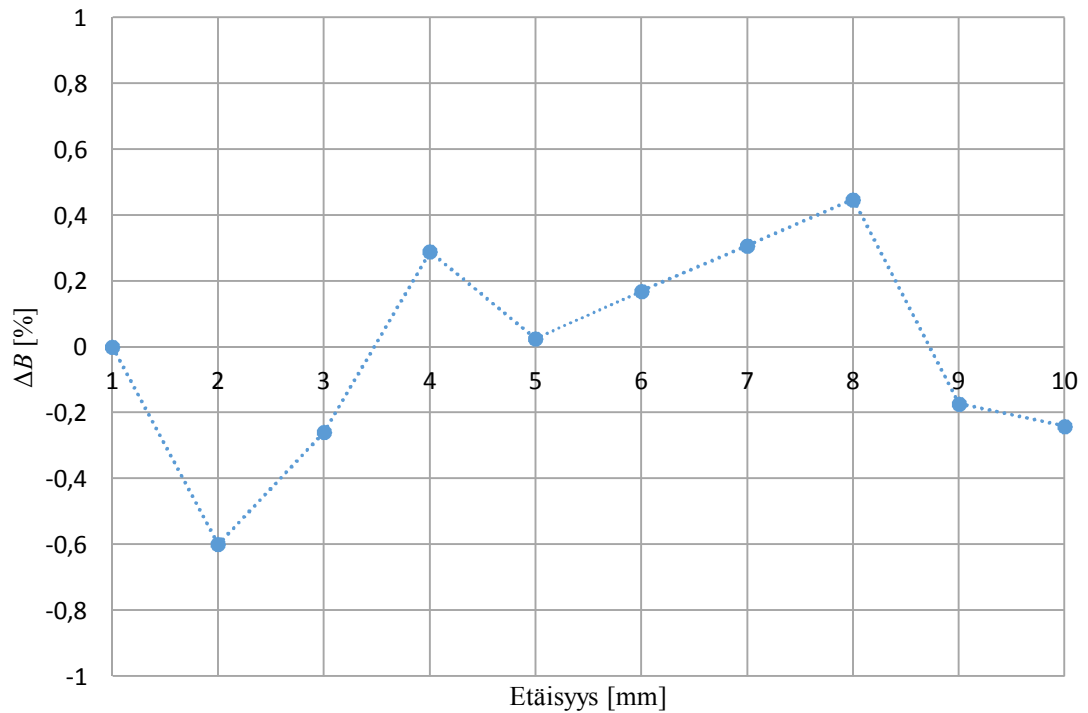
10.5 Hall-anturin sijainnin vaikutus mittaustuloksiin

Avoimen magneettipiirin Hall-anturi ei suoraan ilmaise mitattavan virran suuruutta, vaan se mittaa virran ympärilleen luomaa magneettivuon tiheyttä. Magneettivuon tiheyden suuruus riippuu anturin sijainnista suhteessa virtakiskoon. Tällä mittauksella haluttiin selvittää Hall-anturin sijainnin vaikutusta mittaustarkkuuteen.

Mittaukset suoritettiin Hall-anturin sijaitessa eri etäisyyksillä virtakiskon kapeammasta ja leveämmästä sivusta. Lisäksi Hall-anturia poikkeutettiin virtakiskon keskikohdasta kahdella eri etäisyydellä. Sivulla 55 olevassa kuvassa 34 on esitetty akselit suhteessa virtakiskoon, joilla Hall-anturi mittauksissa sijaitsi.

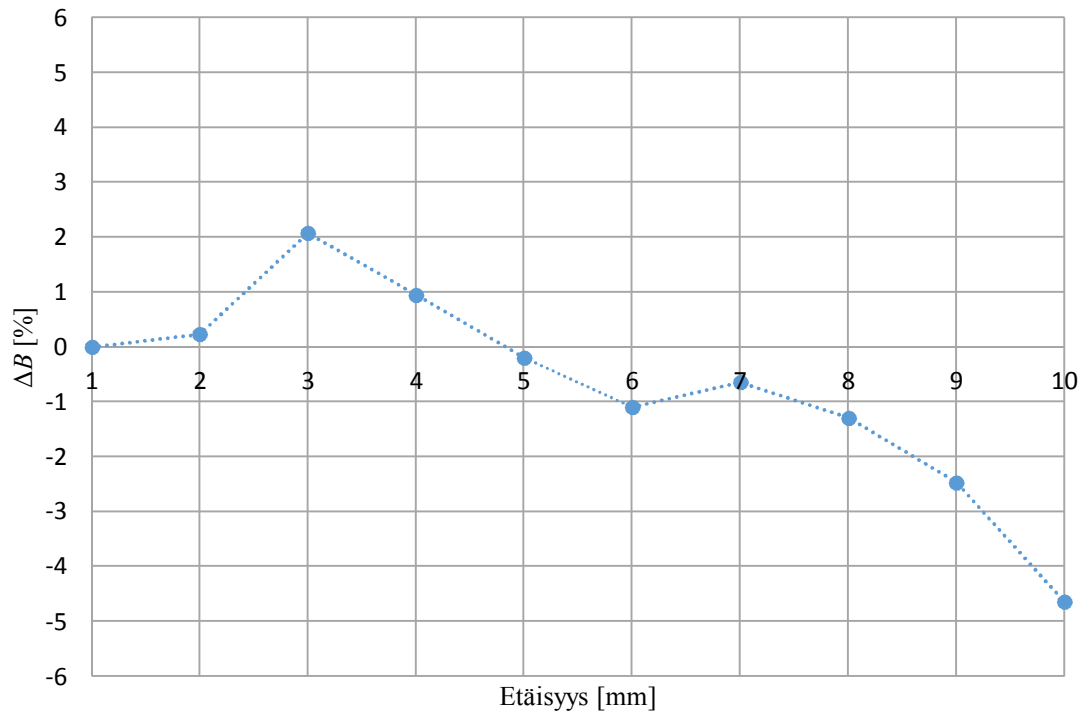
Mittauksissa käytettiin 200 A 50 Hz vaihtovirtaa. Vastaava tilanne simuloitiin, jolloin saatiin selville magneettivuon tiheys eri etäisyyksillä virtakiskosta. Hall-anturin ulostulojännite muutettiin magneettivuon tiheydeksi ja kompensoitiin vahvistusvirheen poistamiseksi, jonka jälkeen Hall-anturin mittaustulosta oli mahdollista verrata simuloituun tilanteeseen. Kompensointi suoritettiin suhteessa 1 mm etäisyyteen virtakiskon keskikohdasta, erikseen sekä kapeammalle että leveämmälle sivulle.

Kuvassa 49 on esitetty Hall-anturin mittausrvirhe suhteessa simuloituun magneettivuon tiheyteen eri etäisyydellä virtakiskon leveämmästä sivusta. Anturi sijaitsee sivuttaissuunnassa tarkasteltuna keskellä virtakiskon leveämpää sivua (a-akseli kuvassa 34 sivulla 55).



Kuva 49. Suhteellinen mittausvirhe anturin ja virtakiskon leveämmän sivun välisen etäisyyden funktiona (a-akseli kuvassa 34 sivulla 55)

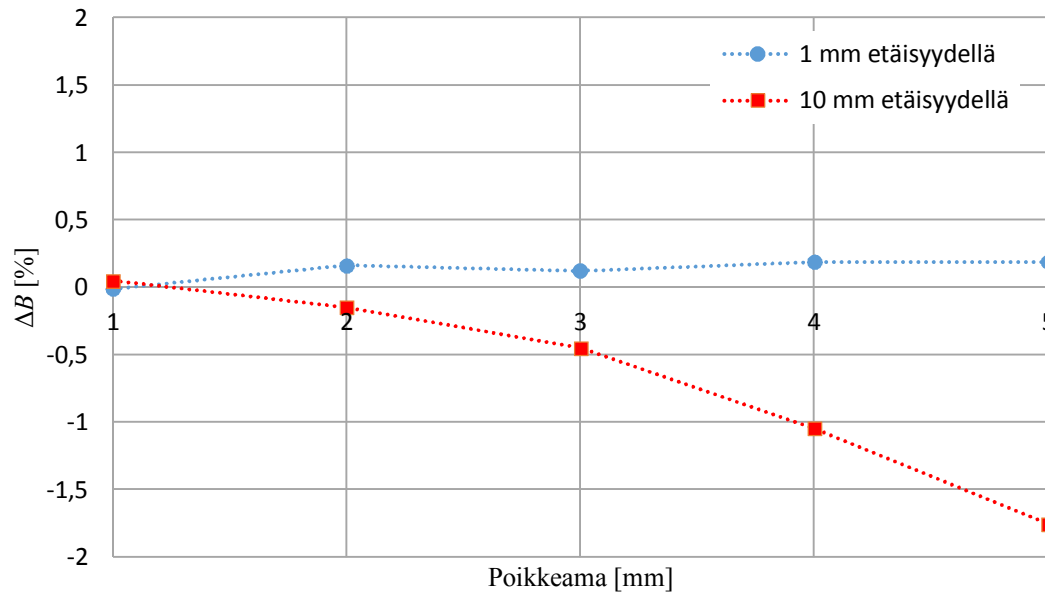
Kuvassa 50 on esitetty Hall-anturin mittausvirhe suhteessa simuloituun magneettivuon tiheyteen eri etäisyydellä virtakiskon kapeammasta sivusta. Anturi sijaitsee sivuttaissuunnassa tarkasteltuna keskellä virtakiskon kapeampaa sivua (b-akseli kuvassa 34 sivulla 55).



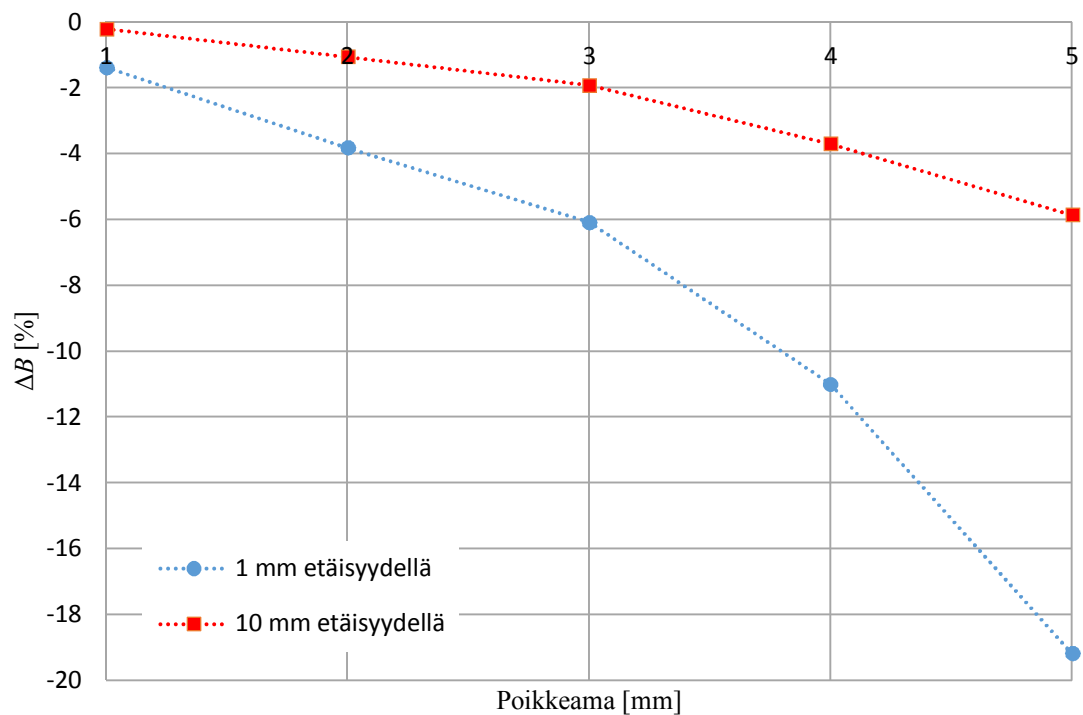
Kuva 50. Suhteellinen mittausvirhe anturin ja virtakiskon kapeamman sivun välisen etäisyyden funktiona (b-akseli kuvassa 34 sivulla 55)

Kuvista 49 ja 50 nähdään Hall-anturin mittausvirheen olevan huomattavasti pienempi, kun Hall-anturi sijaitsee virtakiskon leveämmällä sivulla. Mittausvirheen vaihtelu on myös stabiilimpi kyseisessä sijainnissa. 1 ... 10 mm etäisyydellä virtakiskon leveämmällä sivulla virheen suuruus vaihtelee noin -0,6 % ja 0,4 % välillä. 0,6 % virhe 200 A virralla vastaa noin 1,2 A. Vastaavalla etäisyydellä virtakiskon kapeammalla sivulla virheen suuruus vaihtelee -4,6 % ja 2,0 % välillä.

Kuvissa 51 ja 52 on esitetty mittausvirhe, kun Hall-anturi poikkeaa virtakiskon keskikohdasta leveämmällä ja kapeammalla sivulla. Hall-anturia poikkeutettiin 1 ... 5 mm virtakiskon keskikohdasta, 1 mm välein. Simulointia käytettiin selvittäessä magneettivuontiheys Hall-anturin sijaitessa keskellä virtakiskon kumpaakin sivua, 1 mm ja 10 mm etäisyyksillä. Hall-anturin mittaustulos kompensoitiin vastaamaan näitä simulointituloksia. Virhe on ilmoitettu suhteessa virtakiskon keskikohtien mittaustuloksiin. Sininen viiva kuvaa mittausvirhettä Hall-anturin ollessa 1 mm etäisyydellä virtakiskosta ja punainen viiva mittausvirhettä 10 mm etäisyydellä virtakiskosta.



Kuva 51. Suhteellinen mittausvirhe poikkeaman funktiona virtakiskon leveämmän sivun keskikohdasta 1 mm ja 10 mm etäisyydellä (c-akseli kuvassa 34 sivulla 55)



Kuva 52. Suhteellinen mittausvirhe poikkeaman funktiona virtakiskon kapeamman sivun keskikohdasta 1 mm ja 10 mm etäisyydellä (d-akseli kuvassa 34 sivulla 55)

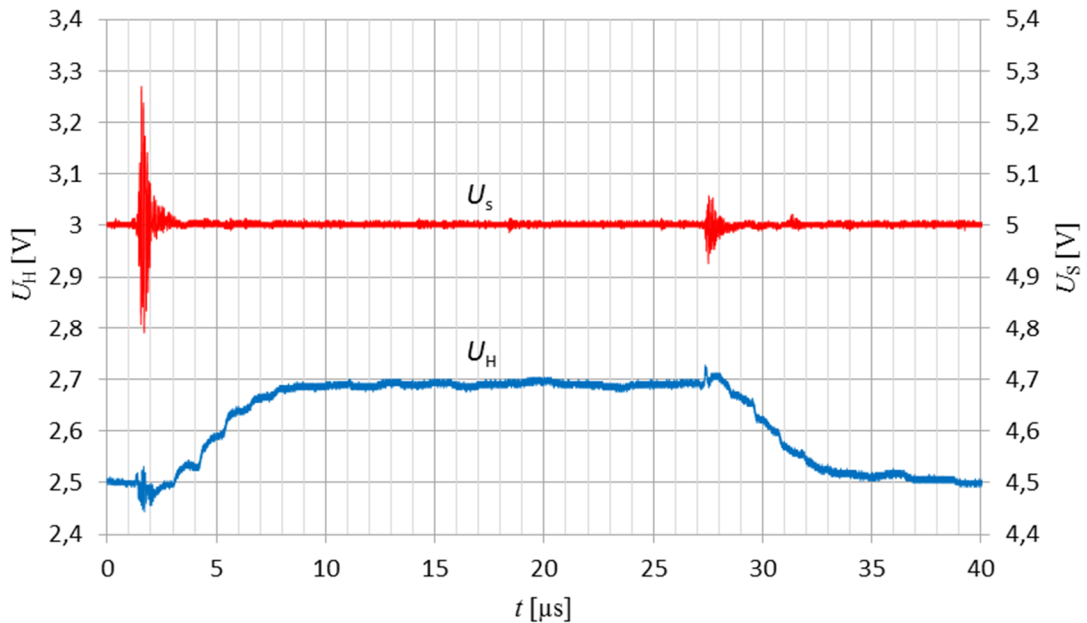
Kuvista 51 ja 52 nähdään mittausvirheen olevan erittäin pientä 1 mm etäisyydellä virtakiskon leveämmästä sivusta. 5 mm poikkeama saa aikaan ainoastaan 0,19 % virheen virtakiskon keskikohdasta mitattuun magneettivuon tiheyteen verrattuna. 10 mm etäisyydellä vastaava virhe on -1,8 %. Kapeammalla sivulla mittausvirheet ovat paljon suuremmat leveämpään sivuun verrattuna. Esimerkiksi 2 mm poikkeama saa aikaan -3,8 % ja -1 % virheen keskikohtaan verrattuna 1 mm ja 10 mm etäisyyksillä.

Mittaustuloksia tarkastellessa täytyy muistaa että tuloksia verrattiin simulointiin. Simulointia käytettiin vertailukohtana, koska käytettävissä ei ollut muita tapoja selvittää magneettivuon tiheyttä eri etäisyyksillä virtakiskosta. Mikäli toista Hall-anturia olisi käytetty, sen tarkkuus olisi vaikuttanut tuloksiin heikentävästi. Simulointi ei täysin vastaa todellista tilannetta. Simulointi suoritettiin tyhjiössä, jossa oli ainoastaan virtakisko, kun todellisessa mittauksessa ympärillä oli myös muita magneettista hajakenttää aiheuttavia lähteitä. Lisäksi simulaattorin matemaattinen malli ei koskaan vastaa täysin todellisuutta. Voidaan kuitenkin olettaa että tällaisessa yksinkertaisessa simuloinnissa magneettivuon tiheyden suhde etäisyyden muutokseen vastaa hyvin paljon todellisuutta. Hall-anturin mittausulos kompensoitiin vastaamaan simulointitulosta 1 mm etäisyydellä virtakiskosta, joten simulointia hyödynnettiin ainoastaan sen selvittämiseksi, kuinka paljon magneettivuontiheys vaimenee eri etäisyyksillä virtakiskosta. Tämän vuoksi simuloinnin aikaansaamaa virhettä voidaan pitää huomattavasti pienempänä kuin mitä mittalaitteet saavat aikaan.

10.6 Dynaaminen suorituskyky

Hall-anturin dynaamisen suorituskyvyn mittauksissa virtapulssin amplitudiksi asetettiin 452 A ja kestoksi 25 μs . Virtapulssin keskimääräiseksi nousunopeudeksi saadaan 120 A/ μs . Mittaukset suoritettiin 21 °C lämpötilassa.

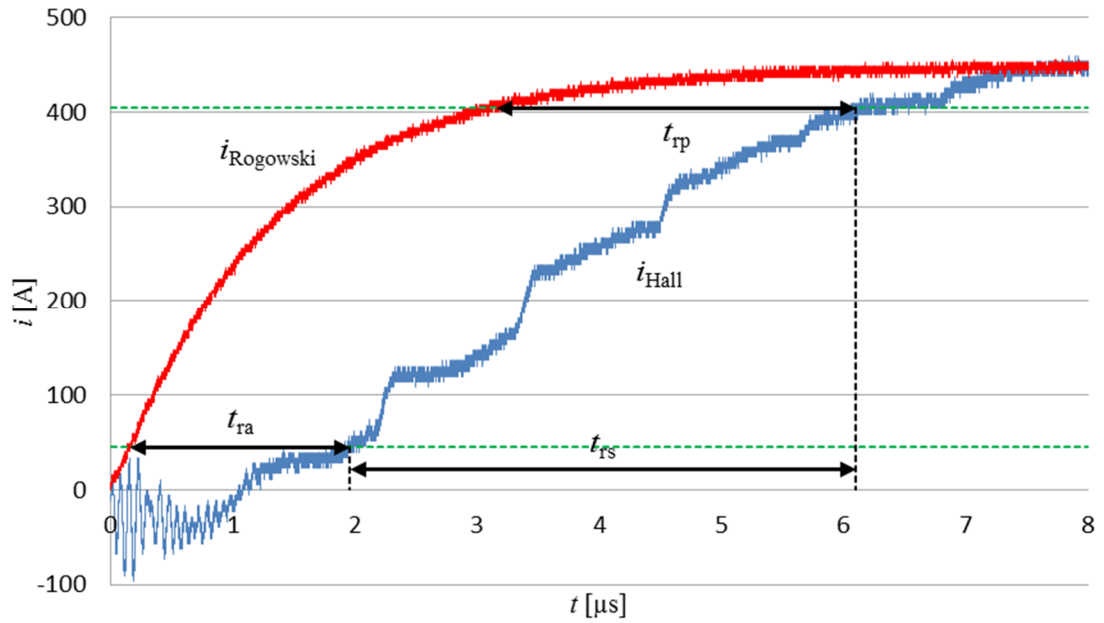
Kuvassa 53 on esitetty Hall-anturin käyttöjännite U_s ja ulostulo U_H . Nämä ovat eri mittausten tulokset, koska maasilmutkaan indusoituvien häiriöiden välttämiseksi kyseisiä mittauksia ei voitu suorittaa samanaikaisesti.



Kuva 53. Hall-anturin käyttöjännite U_s ja ulostulo U_H

Kuvasta 53 havaitaan Hall-anturin käyttöjännitteen värähtelevän IGBT:n kytchentätilanteissa. Värähtelyn amplitudi on noin 0,26 V ja se vaimenee noin 2 μ s aikana. Hall-anturin mittaussignaaliissa käyttöjännitteen värähtely ei kuitenkaan näy kovin suurena juuri IGBT:n kytchentähetkellä. Sen sijaan kytchentähetken jälkeen mittaussignaali kasvaa askelmaisesti, mikä voi johtua käyttöjännitteen värähtelystä. Koska mittaukset suoritettiin erikseen ja värähtely ei ilmene samanlaisena molemmissa mittauksissa, häiriön syynä näyttäisi olevan mittauskytkentä. Syynä IGBT:n kytchentätilanteissa tapahtuvaan käyttöjännitteen värähtelyyn voi olla kapasitiiviset häiriöt, sillä IGBT:n kytchentätilanteissa tapahtuu hyvin nopeita jännitteen ja virran muutoksia, jotka voivat helposti kytkeytyä mittauspiiriin. Mittauskytkennän vuoksi Hall-anturin signaali-, käyttöjännite- ja maadoituskaapelit olivat pitkiä, mikä lisää häiriöiden kytkeytymistä mittauspiiriin. Induktiivisten häiriöiden kytkeytymistä pyrittiin vähentämään kiertämällä käyttöjännite- ja maadoituskaapelit sekä käyttämällä koaksiaalikaapelia signaalikaapelina. Lopullisissa sovelluksissa Hall-anturi sijoitetaan piirikortille, jolloin käyttöjännitteiden ja mittaussignaalien vedot voidaan pitää pieninä ja vähentää tällaisten häiriöiden kytkeytymistä.

Kuvassa 54 on esitetty Hall-anturin dynaaminen suorituskyky. Kuvassa on Rogowskikelan (i_{Rogowski}) ja Hall-anturin (i_{Hall}) mittaama virta ajan funktiona IGBT:n kytchentähetkestä lähtien. Vihreät katkoviivat kuvaavat 10 % (45,2 A) ja 90 % (406,8 A) rajoja virtapulssin amplitudista. Kuvasta 54 määritettiin dynaamiseen suorituskykyyn liittyvät ominaisuudet: reaktio-, nousu- ja vasteaika. Kyseiset ominaisuudet on listattu taulukossa 8. Virtapulssin nousuaika $t_{\text{rs,p}}$ ja nousunopeus di_p/dt on laskettu keskiarvona, kun virta kasvaa arvosta 45,2 A arvoon 406,8 A.



Kuva 54. Hall-anturin dynaaminen suorituskyky

Taulukko 8. Hall-anturin dynaaminen suorituskyky

Ominaisuus	Arvo
Virtapulssin amplitudi \hat{i}_p	452 A
Virtapulssin nousuaika $t_{\text{rs,p}}$	3,0 μs
Virtapulssin nousunopeus di_p/dt	120 A/ μs
Hall-anturin reaktioaika t_{ra}	1,7 μs
Hall-anturin nousuaika t_{rs}	4,3 μs
Hall-anturin vasteaika t_{rp}	3,0 μs

Kuvasta 54 ja taulukosta 8 nähdään Hall-anturin dynaamisen suorituskyvyn olevan hyvä. Vasteaika 3,0 μs vastaa hyvin datalehdessä ilmoitettua vasteaikaa 3,7 μs . Oikosulkusuojauskäyttöön anturi voi kuitenkin olla liian hidas.

10.7 Mittaustulosten yhteenveto

Hall-anturille suoritettut mittaukset osoittivat kyseisen anturin staattisen suorituskyvyn olevan hyvä lukuun ottamatta vahvistusvirhettä. Anturin sisältämä lämpötilakompensointi kompensoi melko hyvin lämpötilan vaikutusta. Alle 0 °C lämpötiloissa nollapistepoikkeamassa sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirheissä alkoi näkyä lämpötilan vaikutus verrattuna 0 ... 100 °C lämpötiloissa suoritettuihin mittauksiin.

Hall-anturin nollapistepoikkeama ja lineaarisuusvirhe olivat hyvin pieniä mutta vahvistusvirhe erittäin suuri. Herkkyys erosi datalehdessä mainitusta arvosta merkittävästi. Allegrolta asiaa tiedusteltaessa ilmeni, että datalehdessä ilmoitettu oletuserkkyys on tyypillinen, mutta voi vaihdella merkittäväksi eri antureiden kesken. Kyseinen anturi tulisi tämän vuoksi ohjelmoida ennen käyttöä. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut muihin mittaustuloksiin, sillä vahvistusvirhe kompensoitiin niistä pois. Hall-anturin nollapiste- ja lineaarisuusvirheiksi saatiin $\pm 0,05$ % ja $\pm 0,04$ %, mikä on erittäin hyvä tulos, sillä datalehti lupaa vastaaviksi virheiksi ± 1 %. Sivulla 51 olevasta taulukosta 3 nähdään että mikäli jätetään huomiotta vahvistusvirhe, Hall-anturi vastaisi tarkkuuden osalta jopa kompensoitua Hall-anturia ($\pm 0,1$... 1 %) sekä GMR:ää ($\pm 0,05$... 2 %) ja virtamuuntajaa ($\pm 0,05$... 1 %).

Hall-anturin dynaaminen suorituskkyky on myös hyvä. Mahdollisesti mittauskytkennästä johtuen dynaamisen suorituskvyn mittaustuloksissa oli häiriöitä. Nämä häiriöt eivät kuitenkaan vaikuttaneet dynaamisen suorituskvyn selvittämiseen. Vasteajaksi saatiin 3,0 μ s, mikä vastaa hyvin datalehdessä ilmoitettua vasteaikaa 3,7 μ s, mutta on hitaampi kuin monien muiden virranmittausmenetelmien vasteajat. Monilla virranmittausmenetelmillä, kuten esimerkiksi suntilla ja Fluxgatella päästään alle 1 μ s vasteaikoihin.

Allegro A1363 Hall-anturin suorituskkyky tässä työssä tehtyjen mittausten perusteella on hyvä. Vaatii kuitenkin lisätutkimuksia, jotta voidaan saada varmuus anturin soveltuvuudesta virranmittaukseen tasasähkökatkojassa tai vastaavissa sovelluksissa. Olisi myös tarpeen mitata suurempi erä kyseisiä Hall-antureita, jotta saataisiin selville todellinen tarkkuuden vaihteluväli. Mittauksia, joita tässä työssä ei aikataulun vuoksi ollut mahdollista suorittaa, ovat muun muassa taajuusvasteen mittausta sekä häiriömittaukset todellisessa käyttöympäristössä.

11. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin avoimen magneettipiirin Hall-anturin soveltuvuutta virtakiskon virranmittaukseen. Työn pääasiallisena sovelluskohteena oli tasasähkökatkoja, mutta työssä saatuja tuloksia voidaan käyttää myös muissa sähkökäytön sovelluksissa. Työssä tutkittiin Allegro A1363 Hall-anturia mittaamalla sen staattista ja dynaamista suorituskkyä.

Työn teoriaosuudessa tutustuttiin virranmittauksen sovelluskohteisiin, eli sähkökäytön komponentteihin, sekä virranmittauksen tehtäviin sähkökäytössä. Lisäksi esiteltiin fysikaalisia ilmiöitä magneettikenttään perustuvien virta-anturien taustalla ja virta-anturien epäideaalisuuksia. Työssä tutustuttiin tarkemmin kolmeen erityyppiseen Hall-anturiin, Fluxgate-, GMR- ja sunttivirta-antureihin sekä Rogowski-kelaan ja virtamuuntajaan, ja vertailtiin näiden ominaisuuksia sekä soveltuvuutta virtakiskon virranmittaukseen.

Allegro A1363 Hall-anturia tutkittiin mittaamalla sen staattista ja dynaamista suorituskkyä. Staattisen suorituskyyvyn mittauksia suoritettiin eri lämpötiloissa, ja niiden avulla selvitettiin anturin nollapistepoikkeamaa sekä vahvistus- ja lineaarisuusvirhettä. Lisäksi tutkittiin anturin sijainnin vaikutusta mittaustuloksiin.

Tämän työn tulosten perusteella Allegro A1363 Hall-anturin staattinen ja dynaaminen suorituskky on hyvä. Anturi on potentiaalinen vaihtoehto korvaamaan aiemmin käytössä olleita virranmittausmenetelmiä. Nämä tulokset eivät kuitenkaan varmuudella kerro soveltuuko kyseinen anturi käytettäväksi jossain tietyssä sovelluksessa. Tämä vaatisi tarkempaa tietoa sovelluskohteiden vaatimuksista muun muassa nollapistepoikkeaman, vahvistus- ja lineaarisuusvirheen, kaistanleveyden, lämpötilan sekä vasteaikojen suhteen. Magneettikentän käyttäytymistä virtakiskon ympärillä tutkittiin simuloinnilla, ja Hall-anturin suorituskkyä mitattiin laboratorio-olosuhteissa, jolloin tilanne eroaa huomattavasti todellisesta käyttöympäristöstä. Todellisen varmuuden saaminen Hall-anturin soveltuvuudesta virranmittaukseen vaatisi mittausten suorittamista todellisessa käyttöympäristössä. Lisäksi mittaukset tulisi suorittaa kahdella Hall-anturilla, jotta voidaan varmistua magneettisen hajakentän kompensoinnin toimivuudesta käytännössä.

LÄHTEET

- [1] J. Niiranen, Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus, 2. korjattu painos, Helsinki: Otatieto, 1999, 381 s.
- [2] J. Martinmaa, Taajuusmuuttajan virtamuuntimien suorituskvyn vertailu, Teknillinen korkeakoulu, 2005, 74 s.
- [3] ABB Oy, ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, osa/vuosik. 18. Sähkömoottorikäytöt, 2000, 35 s.
- [4] O. Niiranen, Suntain käyttö virta-anturina raskaissa työkonosähkökäytöissä, Aalto-yliopisto Sähkötekniikan korkeakoulu, 2013, 90 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201401111118>
- [5] K. Suvanto, K. Laajalehto, Tekniikan fysiikka 2, Edita Publishing Oy, 2006.
- [6] Wikimedia Commons, Electromagnetism.png, Wikimedia Commons, 2006. Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetism.png>
- [7] J. Wetzel, Illustration of Faraday's Law, WikiPremed. Saatavissa: http://www.wikipremed.com/image.php?img=010404_68zzzz142900_37900_68.jpg&image_id=142900
- [8] J. I. Moen, opintojakson FYS3610 luentomoniste, luku 2 The Earth's Permanent Magnetic Field, University of Oslo. Saatavissa: http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3610/h04/undervisningsmateriale/Chapter%202_2708.pdf
- [9] K. Jokela, L. Korpinen, M. Hietanen, L. Puranen, L. Huurto, H. Pättikangas, T. Toivo, A-P. Sihvonen, H. Nyberg, Säteilylähteet ja altistuminen, Säteilyturvakeskus STUK.
- [10] L. Korpinen, Sähkövoimatekniikkaopus, 1998. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/node/158>
- [11] J. Pyrhönen, J. Nerg, Sähkömagnetismi, opintojakson BL30A0300 luentomoniste, luku 11 Magneettimateriaalit, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl30a0300/materiaali/11_magneettimateriaalit.pdf

- [12] ITACA, Basic Electrical Engineering, Magnetic Materials, The Magnetisation Curve, ITACA. Saatavissa: <http://www.itacanet.org/basic-electrical-engineering/part-5-magnetic-materials/>
- [13] Honeywell, Hall Effect Sensing and Application, Freeport, Illinois: Micro Switch Sensing and Control. Honeywell Inc., 117 s. Saatavissa: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magnetoresistive-hall-effect-applications-005715-2-en.pdf>
- [14] L. Söderlund, Sähkömateriaalioppi, opintojakson DEE-13200 luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, 228 s.
- [15] K. Kalantar-zadeh, B. Fry, Nanotechnology-Enabled Sensors, Springer US, 2008, 492 s.
- [16] E. Ramsden, Hall-Effect Sensors: Theory and Application, 2nd edition, Newnes, 2006, 272 s.
- [17] L. Laurila, Analysis of Torque and Speed Ripple Producing Non-Idealities of Frequency Converters in Electric Drives, Lappeenranta University of Technology, 2004, 124 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:951-764-943-6>
- [18] C. Papavassiliou, Transducers and Sensors, opintojakson EE3.02/A04 Instrumentation luentomoniste, Imperial College, 2008, 18 s. Saatavissa: cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E302/1-Sensors.pdf
- [19] W. Kester, Data Conversion Handbook, Analog Devices Inc., 2005, 953 s.
- [20] EEWeb Electrical Engineering Community, Electronics and Electrical Quizzes, Oscilloscope Bandwidth, 2012. Saatavissa: <http://www.eeweb.com/electronics-quiz/oscilloscope-bandwidth>
- [21] LEM, Isolated current and voltage transducers Characteristics – Applications – Calculations, 3rd Edition, LEM, 2012, 47 s. Saatavissa: http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/LEM_398/PDF/lem-engineering-applications-manual.pdf?redirected=1
- [22] A. Bar-Lev, Semiconductor and Electronic Devices, 3rd edition, Prentice Hall, 1993, 469 s.
- [23] M. Shur, Physics of Semiconductor Devices, Prentice Hall, 1990, 680 s.
- [24] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H. C. Iu, L. J. Borle, Current Sensing Techniques: A Review, IEEE Sensors Journal, Vol. 9, 2009

- [25] C. Mathas, The Basics of Current Sensors, Hears Electronic Products, 2012. Saatavissa: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/sep/the-basics-of-current-sensors>
- [26] P. Emerald, Non-Intrusive Hall-Effect Current-Sensing Techniques Provide Safe, Reliable Detection and Protection for Power Electronics. Saatavissa: <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Non-Intrusive-Hall-Effect-Current-Sensing-Techniques-for-Power-Electronics.aspx>
- [27] T. Bratland, M. J. Caruso, R. Schneider, C. H. Smith, A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Honeywell Solid State Electronics Center, 1998, 19 s.
- [28] J. E. Lenz, A Review of Magnetic Sensors, Proceeding of the IEEE, Vol. 78, issue 6, 1990
- [29] H. Nyström, Virranmittausanturin suunnittelu ja simulointi taajuusmuuttajakäyttöön, Lappeenrannan teknillinen yliopisto sähkötekniikan osasto, 2007, 56 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20071262>
- [30] R. S. Popovic, P. M. Drljaca, C. Schott, Bridging The Gap Between AMR, GMR, And Hall Magnetic Sensors, 23rd International Conference on Microelectronics, vol. 1, 2002
- [31] Y. Ouyang, J. He, J. Hu, S. X. Wang, A Current Sensor Based on the Giant Magnetoresistance Effect: Design and Potential Smart Grid Applications, Sensors, Vol. 12 Issue 11, 2012. Saatavissa: www.mdpi.com/1424-8220/12/11/15520/pdf
- [32] Allegro MicroSystems, LLC, A1363 Datasheet. Saatavissa: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A1363-Datasheet.ashx>

LIITE A: MITTALAITTEET

Taulukko 9. *HP 3478A kalibrointitulokset*

Kalibrointi 12.03.2014	Virhe
30 mV _{DC}	0,0001 mV
300 mV _{DC}	0,000 mV
3 V _{DC}	0,00000 V
300 mV _{AC} @ 50 Hz	0,321 mV
3 V _{AC} @ 50 Hz	0,0027 V

Taulukko 10. *HP 34401A kalibrointitulokset*

Kalibrointi 23.02.2015	Virhe
100 mV _{DC}	0,0024 mV
1 V _{DC}	-0,0014 V
10 V _{DC}	-0,0011 V
100 mV _{AC} @ 1 kHz	-0,0446 mV
1 V _{AC} @ 1 kHz	0,000000 V
10 V _{AC} @ 1 kHz	-0,00757 V

Taulukko 11. *Hilo Test WSM 600 ominaisuudet*

Ominaisuus	Arvo
Nimellinen virta	600 A
Maksimivirta	40 kA
Resistanssi	100 $\mu\Omega$
Kaistanleveys	30 kHz
Nousuaika	< 12 μ s
Ulostulojännite	6 μ V/A (60 mV / 600 A)

Taulukko 12. *Hilo Test WSM 600 kalibrointitulokset*

Kalibrointi 14.05.2014	Virhe
10 A _{DC}	-0,0008 mV (-8 mA)
100 A _{DC}	-0,0087 mV (-87 mA)
100 A _{AC} @ 1 kHz	0,0035 mV (35 mA)

Taulukko 13. *Tektronix DPO 4104*

Kalibrointi 14.11.2014	Virhe
100 mV/div	±3 mV
1 V/div	±49 mV

Taulukko 14. *PEM CWT 15R ominaisuudet*

Ominaisuus	Arvo
Maksimivirta	3 kA
di/dt (maks.)	20 kA/μs
Ulostulojännite	2,0 mV/A

Taulukko 15. *PEM CWT 15R kalibrointitulokset*

Kalibrointi 21.10.2014	Virhe
500 A _{AC} @ 50 Hz	-1 A
1000 A _{AC} @ 50 Hz	-2 A
1500 A _{AC} @ 50 Hz	-3 A
2000 A _{AC} @ 50 Hz	-3,5 A